

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

ANALÝZA DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ PŮSOBÍCÍCH NA VÝHYBKOVÉ KONSTRUKCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

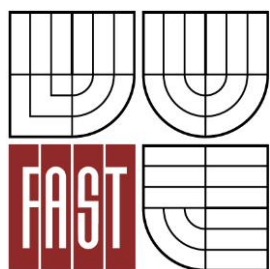
AUTHOR

DANIELA SADLEKOVÁ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

ANALÝZA DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ PŮSOBÍCÍCH NA VÝHYBKOVÉ KONSTRUKCE

ANALYSIS OF DYNAMIC EFFECTS ACTING ON CROSSINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

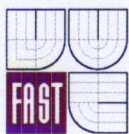
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DANIELA SADLEKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV SMUTNÝ, Ph.D.

BRNO 2013



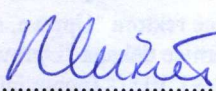
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav železničních konstrukcí a staveb

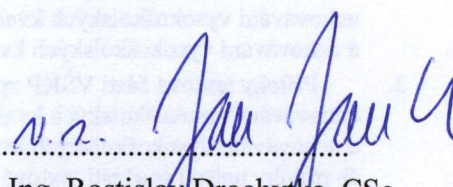
ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Daniela Sadleková
Název	Analýza dynamických účinků působících na výhybkové konstrukce
Vedoucí bakalářské práce	prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2012
Datum odevzdání bakalářské práce	24. 5. 2013

V Brně dne 30. 11. 2012


.....
doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- Coenraad Esveld: Modern railway track, TU Delft, 2001, ISBN 90-800324-3-3
Plášek O., Zvěřina P., Svoboda R., Mockovčíak M.: Železniční stavby, Cerm, 2004, ISBN 80-214-2621-7
Popp K., Schiehlen W.: System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles, track and subgrade, Springer, ISBN 3540438920
Jurda K., Drahoš M.: Železniční spodok a svršok I., II., Nadas 1988
Vlasák J.: Výhybky a výhybková spojení, NADAS, 1983
Moravčík M., Moravčík M.: Mechanika železničních tratí 3 – Experimentálna analýza namáhania a pretvorenia komponentov trate, EDIS, Žilina, 2002, ISBN 80-7100-985-7
Vukušič I.: Měření a analýza dynamických účinků ve výhybce, DP, 2007

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Cílem bakalářské práce bude analýza a srovnání dynamických účinků působících na vybranou konstrukci, případně na vybrané konstrukce. Měření budou probíhat v reálném provozu (in-situ). Studentka se bude podílet na sestavení metodiky měření, na přípravě a realizaci měření a vybere a použije vhodné matematické postupy pro analýzu naměřených dat. Práce bude obsahovat úvod do řešené problematiky, analýzu současného stavu, návrh řešení, popis navržené metodiky měření, analýzu naměřených dat, vyhodnocení naměřených dat, závěry a doporučení.

Doporučené přílohy:

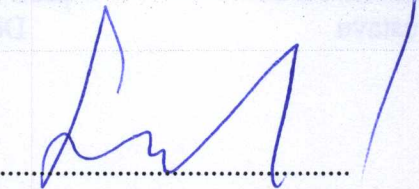
Vyhodnocení dynamických parametrů v časové rovině

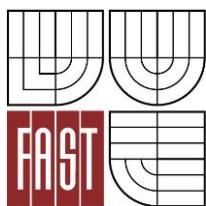
Vyhodnocení dynamických parametrů ve frekvenční rovině

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).


prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

Autor práce Daniela Sadleková

Škola Vysoké učení technické v Brně

Fakulta Stavební

Ústav Ústav železničních konstrukcí a staveb

Studijní obor 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby

Studijní program B3607 Stavební inženýrství

Název práce Analýza dynamických účinků působících na výhybkové konstrukce

Název práce v anglickém jazyce Analysis of dynamic effects acting on crossings

Typ práce Bakalářská práce

Přidělovaný titul Bc.

Jazyk práce Čeština

Datový formát elektronické verze

Anotace práce Práce je zaměřena na měření a analýzu dynamických účinků ve výhybkách. V rámci práce byly vytipovány dvě výhybky v různém stádiu opotřebení, pozornost byla zaměřena především na oblast srdcovky výhybky, kde dochází k největším dynamickým účinkům. Cílem práce je srovnání výhybek z hlediska dynamického chování a stanovení vlivu opotřebení na dynamické účinky. Součástí práce je sestavení metodiky měření a návrh vhodného matematického aparátu pro vyhodnocení dynamických dějů ve výhybkách.


Anotace práce v anglickém jazyce This thesis is focused on measurement and analysis of dynamic effects on railway turnouts. Two turnouts with different wear condition were chosen. My attention was focused mainly on the crossing part of the turnout, where the highest dynamic impacts occur. The point of the thesis is comparison of the crossing part of turnouts in term of dynamic behaviour and assessment of influence of the wearing depth on dynamic effects. A part of the thesis is proposal of methodology of the measurement and convenient mathematical

	apparatus for analysing of dynamic effects on crossings.
Klíčová slova	Výhybka, srdcovka, pražec, dynamické účinky, posuny, vibrace, měření, analýza, Fourierova transformace
Klíčová slova v anglickém jazyce	Railway turnout, crossing part, sleeper, dynamic effects, shifts, vibration, measurement, analysis, Fourier transform

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24.5.2013


.....
podpis autora
Daniela Sadleková

Bibliografická citace VŠKP

SADLEKOVÁ, Daniela. *Analýza dynamických účinků působících na výhybkové konstrukce*. Brno, 2013. 63 s., 198 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24.5.2013



podpis autora
Daniela Sadleková

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat všem, kteří se svou činností podíleli na vzniku této bakalářské práce, ať už se jednalo o přípravu měření či samotnou účast na něm, poskytnutí odborné literatury nebo vypůjčení měřících pomůcek. Jmenovitě se jedná především o Ing. Miroslavu Hruzíkovou, Ph.D., Ing. Vladimíra Tomandla a Bc. Jana Hajniše.

Zvláštní díky si zasluhuje zejména můj vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D., jež nese zásadní podíl na zdárném dokončení tohoto díla. Svou vstřícností a časem obětovaným konzultacím, jež mnohonásobně převýšil jeho pracovní povinnosti, mi výrazně pomohl zvládnout veškerá úskalí týkající se této mezioborové a po všech stránkách poměrně náročné problematiky.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Rozbor současného stavu dané problematiky	2
2.1 Namáhání srdcovky	2
2.1.1 Mechanismus přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky	3
2.1.2 Silové působení kol na srdcovky	7
3. Cíle práce	9
4. Vibrace	9
4.1 Základní veličiny pro vyhodnocování vibrací	9
4.2 Popis signálu v časové oblasti.....	10
4.3 Vzorkování signálu	11
4.4 Popis signálu ve frekvenční oblasti.....	12
5. Snímače	13
5.1 Indukčnostní snímače pro měření pohybů	13
5.2. Piezoelektrické snímače pro měření zrychlení vibrací	14
6. Návrh metodiky měření.....	17
6.1 Sledování šíření vibrací u výhybkových konstrukcí.....	18
6.2 Měření pohybového chování konstrukce	19
7. Matematický aparát.....	22
7.1 Efektivní hodnota zrychlení vibrací.....	22
7.2 Fourierova transformace	23
7.3 Welchova metoda.....	23
7.4 Krátkodobá (okénková) Fourierova transformace (STFT).....	24
8. Popis měření.....	24
8.1 Popis měřicí lokality a vybraných výhybek.....	24
8.2 Měření laserovým profiloměrem	25
8.3 Přesná nivelace.....	27
8.4 Měření dynamických účinků.....	29
9. Vyhodnocení naměřených dat.....	32
9.1 Vyhodnocení pohybového chování pražců.....	32
9.2 Vyhodnocení přenosu vibrací konstrukcí	44
9.2.1 Vyhodnocení zrychlení vibrací v časové rovině	44
9.2.2 Vyhodnocení zrychlení vibrací ve frekvenční rovině.....	56

9.2.3	Vyhodnocení zrychlení vibrací v časově – frekvenční rovině	58
10.	Závěr.....	60
11.	Doporučení	62
Literatura		63

1. Úvod

Jedním z hlavních problémů dnešní železnice je především údržba a minimalizace nákladů s ní spojených. Z toho důvodu je nutné, abychom věnovali pozornost diagnostice železničních tratí a dokázali stanovit taková opatření, která by vedla k minimalizaci nákladů. Mezi efektivní nástroje diagnostiky patří měření dynamických účinků.

Dynamické účinky narůstají se zvyšující se rychlostí vlaků, proto se stále častěji budeme setkávat s jevy, jejichž uspokojivé objasnění a technické řešení bude závislé na pochopení dynamického namáhání konstrukce železniční tratě. Dynamické namáhání koleje je ovlivněno vlastnostmi všech součástí železničního svršku, tj. kvalitou šterkového lože, typem pražců, kvalitou jejich podbití, vlastnostmi drobného kolejiva a typem upevňovadel a rovněž kvalitou tělesa železničního spodku [2].

Zvláště v místech přerušení plynulosti a v místech změny tuhosti kolejové jízdní dráhy dochází ke zvýšeným dynamickým účinkům. V těchto místech pak dochází k nepravdělnému sedání kolejového lože, drcení kameniva kolejového lože a vadám na pojížděné ploše kolejnic [4].

Výhybky a výhybkové konstrukce patří z hlediska dynamických účinků k nejvíce zatíženým místům železniční dopravní cesty. Jejich správná funkce a údržba má zásadní vliv na bezpečnost železničního provozu. Ačkoliv délka koleje s výhybkami představuje jen malou část železniční sítě, údržba výhybek (včetně kolejových křižovatek a jiných speciálních kolejových konstrukcí) je zhruba stejně nákladná jako údržba zbylé železniční sítě bez výhybek. Je to dáno především složitým silovým působením, které vyvolává průjezd vlakové soupravy výhybkou a také nutností udržovat mnoho součástí, z nichž se výhybková konstrukce skládá. Kromě toho, že údržba výhybek s sebou přináší velké přímé náklady (náklady na údržbu), generuje také velké náklady nepřímé (náklady na zpoždění vlaků při údržbě nebo při pomalých jízdách, náklady na odklony, příp. náhradní dopravu, ...) [5].

Z těchto důvodů se ve své práci zaměřím na analýzu a srovnání dynamických účinků ve výhybkách.

2. Rozbor současného stavu dané problematiky

Protože nároky na únosnost se pořád zvyšují, je snaha o větší tuhost konstrukčních vrstev a zemní pláně a také se používají již téměř výhradně betonové pražce, jejichž ohybová tuhost je mnohem větší a pružnost menší než u pražců dřevěných. Všechny tyto aspekty způsobují větší namáhání kolejového lože, které se pod vyšším zatížením deformuje, a tak nepříznivě ovlivňuje geometrické parametry koleje. Tyto problémy se týkají také výhybek a výhybkových konstrukcí, kde svou roli navíc ještě hraje změna tuhosti jízdní dráhy oproti běžné koleji (ve výhybce jsou delší a hmotnější pražce a větší koncentrace kolejnic) a tuhost se navíc mění i v samotné výhybce. Klasická výhybka je také místem, kde je přerušena pojížděná hrana kolejnice a kde proto dochází k dynamickým rázům [3]. Detailnější popis tohoto jevu bude předmětem následující kapitoly. Je nutné počítat také s ojetím kolejnic, kterým se dynamické účinky rovněž zvyšují.

S přihlédnutím na všechny tyto faktory lze říct, že nejvíce namáhaným místem výhybky je její srdcovková část.

2.1 Namáhání srdcovky

Srdcovková část výhybky je tvořena křídlovými kolejnicemi, srdcovkovým klínem a srdcovkovými kolejnicemi navazujícími na srdcovkový klín. Nejdůležitějším místem této části z hlediska dynamických účinků je oblast přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, kde dochází, v závislosti na kvalitě geometrie přechodu, k dynamickému rázu. Tento ráz se přes pražce přenesení do kolejového lože, které je tím extrémně namáháno, což vede k obroušování zrn kameniva štěrkového lože na styku s pražcem, v důsledku čeho dochází k degradaci tvaru kolejového lože pod pražcem a to způsobí nedostatečné podepření výhybky. Pokud není výhybka dostatečně podepřena, zhroutlí se geometrie přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky a celý proces degradace se tím velmi urychlí.

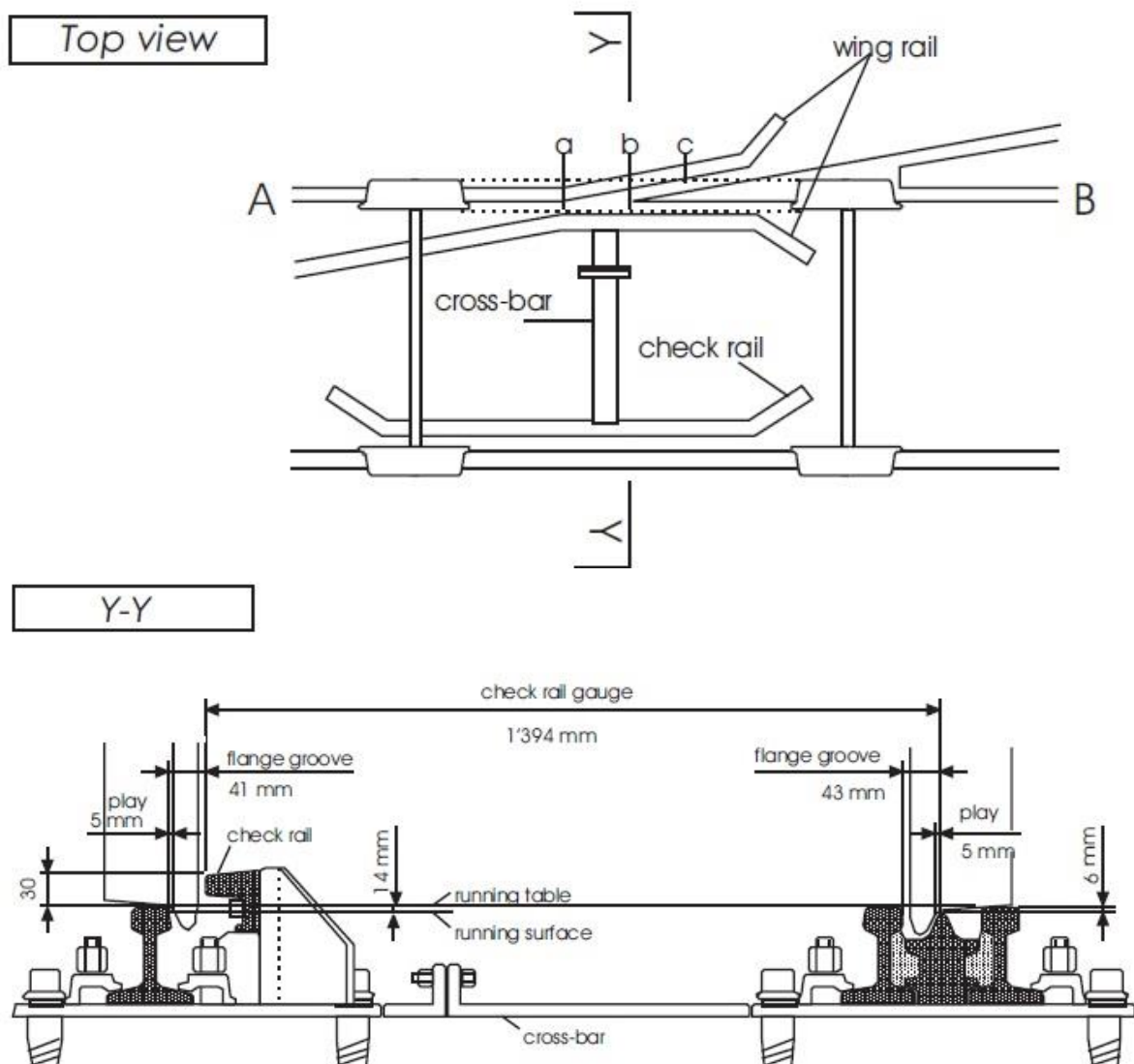
Je tedy zřejmé, že ve snaze vyhnout se výše uvedenému procesu degradace, je klíčovou záležitostí udržení geometrie přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky co nejdelší dobu v optimálním stavu.

2.1.1 Mechanismus přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky

Geometrii přechodu ovlivňuje více parametrů. Jsou to především:

- Kvalita materiálu výhybky (profil hlavy kolejnic a jakost oceli)
- Kvalita vozového parku (odpružení, hmotnost na nápravu, kvalita jízdní plochy nákolku kola)
- Kvalita geometrie koleje ve výhybce (rozchod, zborcení, převýšení, úklon kolejnic)
- Kvalita podepření a tuhost koleje (podložka pod patou kolejnice, upevnění, pražce, podpražcové podložky, šterkové lože, železniční spodek) [3].

I při použití moderní technologie a softwarů je modelování skutečné zatěžovací situace kola působícího na srdcovku velmi obtížné. Proto používáme pro popis geometrie přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky zjednodušený model, který je následující. Při průjezdu najíždí kolo na křídlovou kolejnici, která se před hrotem srdcovky odkloní k ose koleje, aby vytvořila prostor pro srdcovkový klín. Vlivem tvaru železničního kola se poloměr, po kterém kolo jede, směrem od okolku zmenšuje. Dochází tak ke klesání kola ve vertikální rovině, a to až do místa, kde narazí na srdcovkový klín, který je v určitém úklonu. Od tohoto momentu začne kolo opět stoupat, až se dostane do polohy, ve které bylo před najetím na odklon křídlové kolejnice. V příčném řezu je tento jev zobrazen na obr. 2.1.1.2, pokles kola při najetí na hrot srdcovky je také vidět na obr. 2.1.1.1. V popisované části není kolo vedeno a mohlo by dojít k vykolejení, proto se na straně odlehlé od srdcovky montuje přídržnice (obr. 2.1.1.1), která přidrží dvojkolí ve správné stopě.

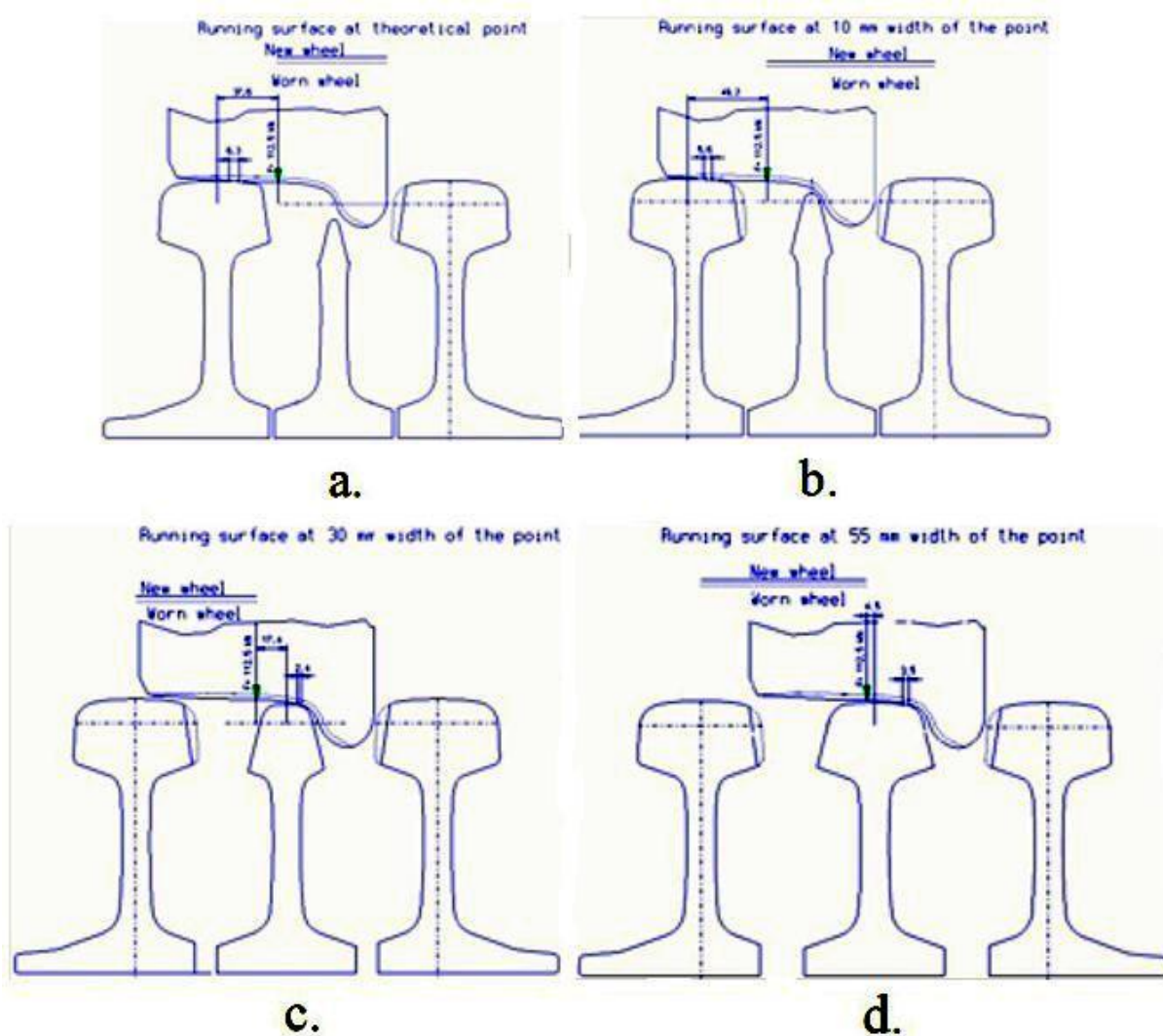


Obr. 2.1.1.1 Schematické znázornění přejezdu dvojkolí přes srdcovku – pohled shora a příčný řez (a – kolo je podporováno křídlovou kolejnicí, b – místo „skoku“ kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, c – kolo je podporováno hrotem srdcovky) [7]

Pokud se na geometrii přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky díváme z pohledu příčného řezu, můžeme pozorovat následující tři stavy:

- Kolo se pohybuje po křídlové kolejnici a přibližuje se k hrotu srdcovky. Kontakt mezi kolem a kolejnicí je jednobodový (obr. 2.1.1.2a)
- Kolo najíždí na hrot srdcovky, přičemž je pořád v kontaktu i s křídlovou kolejnicí, zatížení od kola je přenášeno z křídlové kolejnice na hrot srdcovky (obr. 2.1.1.2b, 2.1.1.2c)
- Kolo opustilo křídlovou kolejnici a je již vedeno pouze hrotem srdcovky (obr. 2.1.1.2d)

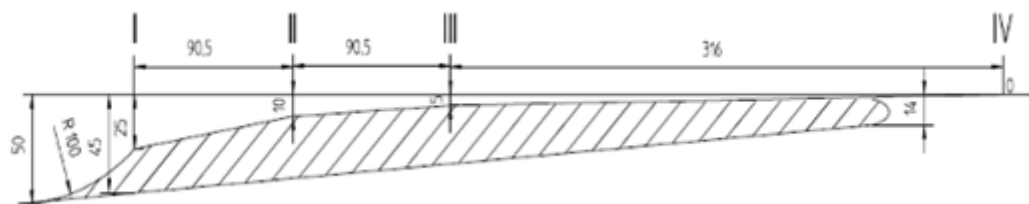
Čím hladší tento přechod je, tím menší je nárůst dynamické síly [7].



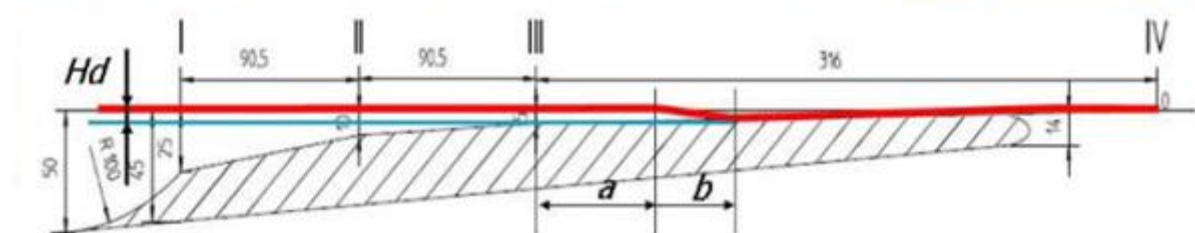
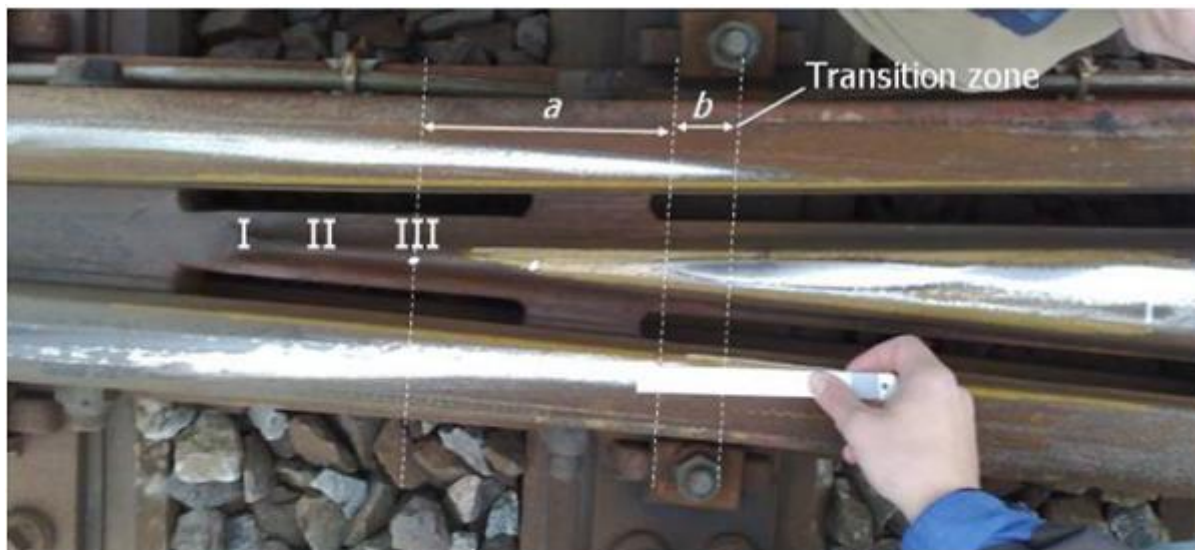
Obr. 2.1.1.2 Přejezd kola srdcovkou [7]

Plynulost přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky je závislá na geometrických vlastnostech kola i kolejnic. Zvýšené dynamické účinky se vyskytnou při přejezdu opotřebovaného kola novou srdcovkou, stejně tak, jako při přejezdu nového kola srdcovkou, která je ve špatném stavu [6].

Na obr. 2.1.1.3 je znázorněn podélný řez hrotem srdcovky. Výška hrotu postupně roste od nuly, až dosáhne hodnotu výšky křídlové kolejnice, což je na obrázku znázorněno bodem IV. Největší dynamická síla vzniká, když kolo vjíždí do „přechodové zóny“ v pozici II. Z důvodu redukce poškození srdcovkového klínu se v praxi zřizuje nadvýšení křídlové kolejnice. Tímto zásahem se posune „přechodová zóna“ dále od začátku srdcovkového klínu (obr. 2.1.1.4) [7].



Obr. 2.1.1.3 Podélný řez hrotem srdcovky [7]



Obr. 2.1.1.4 Lokální vertikální geometrie přechodové oblasti založená na vizuální prohlídce srdcovky [7]

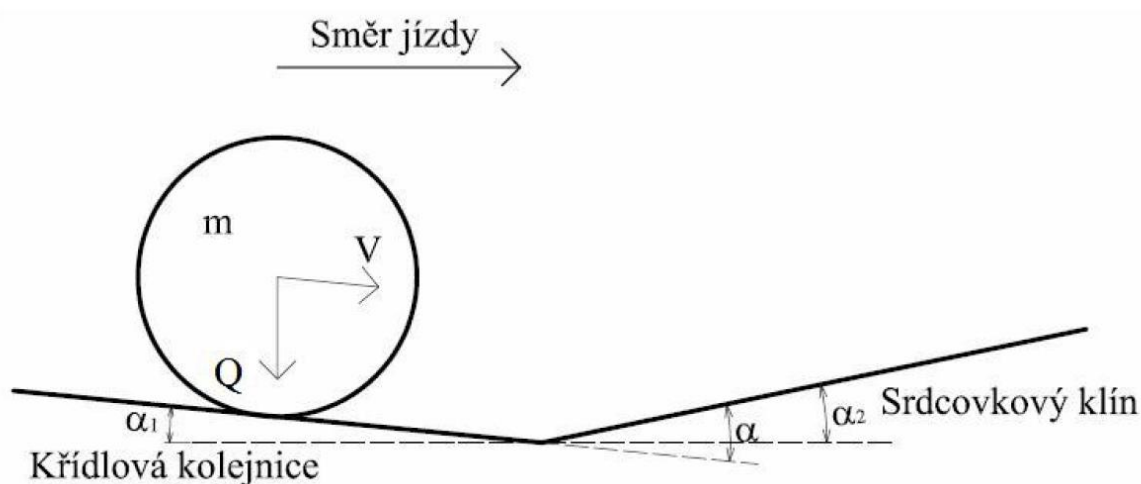
Z toho plyne, že vertikální geometrie v srdcovce je závislá od dvou následujících parametrů:

- Začátek „přechodové zóny“, na které se přenese zatížení od kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky (a)
- Délka „přechodové zóny“ (b)

V [7] jsou popsány výsledky numerické simulace tohoto přechodu, které ukázaly, že dynamické síly jsou silně ovlivněny geometrickými vlastnostmi kola a kolejnice.

2.1.2 Silové působení kol na srdcovky

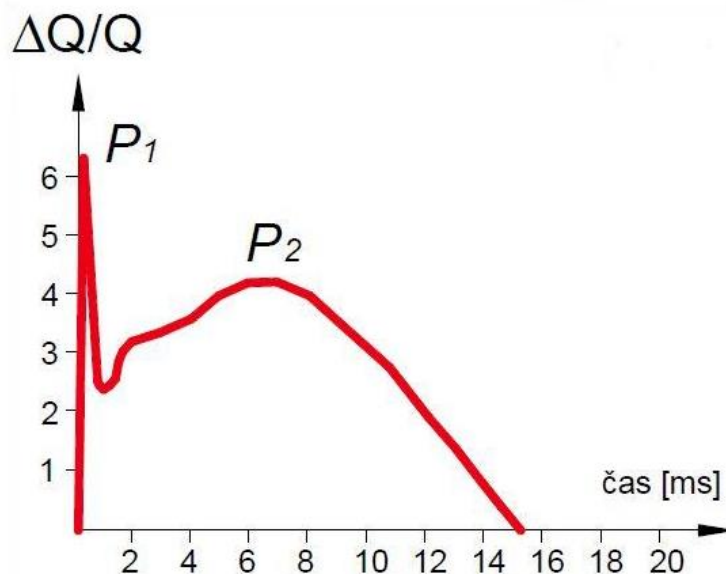
Přejezd srdcovkou může být charakterizován dvěma po sobě následujícími silovými vrcholy vyvolanými koly. Původ dvou silových vrcholů je založen na faktu kolo s neodpruženou hmotností m , které rychlostí V přejíždí přes mezeru (kolo najíždí na křídlovou kolejnici, klesá, naráží na srdcovkový klín a opět stoupá) při svém pohybu přes srdcovkovou část výhybky (obr. 2.1.2.1). První kolo jede dolů v horizontální rovině po křídlové kolejnici s úhlem náklonu α_1 . Poté, co má první kolo kontakt se srdcovkou na špičce srdcovkového hrotu, který je v úklonu, začne stoupat nahoru pod úhlem úklonu srdcovkového klínu α_2 . Celkový úhel sklonu jízdy kola je tedy $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$, což zvyšuje rázy na srdcovkový klín. Zjednodušeně lze zmíněný děj popsat modelem na obr. 6. Je nutné ještě podotknout, že úhly α_1 a α_2 jsou velmi malé, na obrázku jsou pro názornost zvětšeny [10].



Obr. 2.1.2.1 Zjednodušený model pohybu kola přes srdcovku [10]

Odbornou veřejností je všeobecně přijímána následující hypotéza týkající se dynamického zatížení (dynamického rázu) na srdcovce výhybky. První odezva srdcovky na dynamický ráz, při přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, se odehraje jako „vysokofrekvenční kontaktní proces“ („tvrdý ráz“) a je popsán silou P_1 . S ohledem na stav napjatosti, P_1 ovlivní hlavu srdcovky a způsobí typické rozložení kontaktního napětí. Po prvním kontaktu kola s hrotem srdcovky je změna hybnosti neodpružené hmotnosti přenesena na celý systém, který neobsahuje jen srdcovku, ale zahrnuje také sousední kolejnice, podložky pod kolejnicí, pražce a pražcové podloží, tento ráz může být nazýván spíše jako „nízkofrekvenční ohybový proces“ („měkký ráz“), přičemž odpovídající síla je označena jako P_2 . S ohledem na stav napjatosti, P_2 ovlivňuje patu srdcovky a kolejnice,

kde vzniká napětí od ohybu [10]. Při stanovení životnosti se zpravidla uvažuje právě toto napětí, viz [9]. Situace může být vyjádřena grafem na obr. 6 [11].



Obr. 2.1.2.2 Rázové síly na srdcovce [11]

Po nárazu kola se šíří vibrační energie od povrchu srdcovky směrem dolů k relativně tuhé podkladnici a pražci, na které je srdcovka uložena. Malá část energie je zachycena vnitřním tlumením samotné srdcovky, část energie je utlumena na podložce a pražci, ale část energie se také odrazí zpět, což je patrné na poklesu a následném stoupání silových účinků mezi silovým vrcholem P_1 a P_2 na obr. 2.1.2.2. Celková energie působící na srdcovku se skládá z deformační a kinetické, přitom kinetická energie aktivuje určitou hmotnost srdcovky [10]. U každého silového vrcholu působí jiná efektivní hodnota hmotnosti koleje. V případě síly P_1 se jedná zejména o hmotnost malé části srdcovky, což dokázali publikované analýzy metodou konečných prvků [12]. Tato hmotnost je vzhledem k relativně vysoké neodpružené hmotnosti kola poměrně malá. V případě hmotnosti pro výpočet silového vrcholu P_2 se již, naopak, jedná o hmotnost nezanedbatelnou, neboť změna hybnosti se přenesla na celý systém a spolu se srdcovkou již působí i okolní kolejnice, pražce a pražcové podloží.

Silový vrchol P_1 se na konstrukci výhybky projeví především povrchovou deformací hrotu srdcovky, případně křídlové kolejnice, dle převládajícího směru jízdy. Silový vrchol P_2 pak zatěžuje srdcovku výhybky, okolní kolejnice a pražce ohybovým napětím.

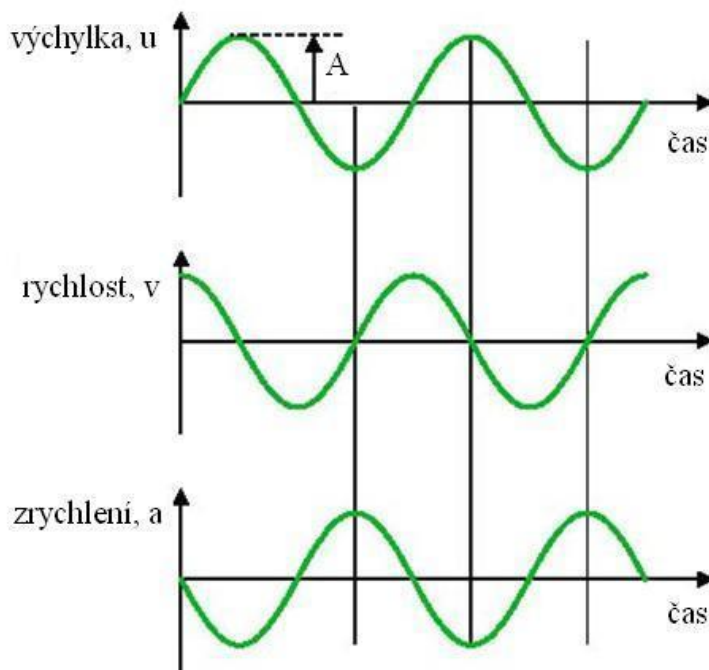
3. Cíle práce

1. Ověření vlivu geometrie přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky na dynamické účinky (změřit geometrii přechodu pomocí laserového profiloměru, získat kompletní informaci o šíření dynamického rázu v blízkém okolí hrotu srdcovky přes pražce až do šterkového lože, měřit svislá posunutí pražců podél srdcovky výhybky a svislá posunutí nejvíce namáhaného pražce)
2. Vytipování vhodných konstrukcí pro měření
3. Návrh metodiky měření (návrh typů použitých snímačů, návrh rozmístění snímačů)
4. Volba vhodného matematického aparátu pro vyhodnocení naměřených dat
5. Zformulovat závěry a doporučení

4. Vibrace

4.1 Základní veličiny pro vyhodnocování vibrací

Základními určujícími veličinami při vyhodnocování mechanického kmitání jsou výchylka, rychlost a zrychlení. Pokud budeme posuzovat veličiny z hlediska frekvenční oblasti, tak pro nízké frekvence (řádově Herty) je vhodné vyhodnocovat amplitudu, pro vysokofrekvenční složky kmitání je vhodné vyhodnocovat efektivní hodnotu zrychlení [13]. Jak je patrné z obr. 4.1.1, rychlost kmitání je v porovnání s výchylkou ve fázovém předstihu o $\pi/2$ a zrychlení kmitání ve fázovém předstihu o π .



Obr. 4.1.1 Grafické znázornění závislosti výchylky, rychlosti a zrychlení na čase [13]

Pokud označíme u jako výchylku, v jako rychlost, a jako zrychlení, A jako amplitudu, ω jako úhlovou frekvenci a t jako čas, pak můžeme popsat vztahy mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením kmitání následujícími vzorci:

$$u = A \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

$$u = A \quad (2)$$

$$v = \frac{du}{dt} = A\omega \cos \omega t \quad (3)$$

$$v = A\omega = A2\pi f \quad (4)$$

$$a = \frac{d^2u}{dt^2} = A\omega^2 \sin \omega t \quad (5)$$

$$a = A\omega^2 = A \cdot 4\pi^2 f^2 \quad (6)$$

4.2 Popis signálu v časové oblasti

V časové rovině jsme schopni signál popsat pouze statisticky.

Nejdůležitější veličiny pro popis signálu v časové oblasti jsou tyto (obr. 4.2.1):

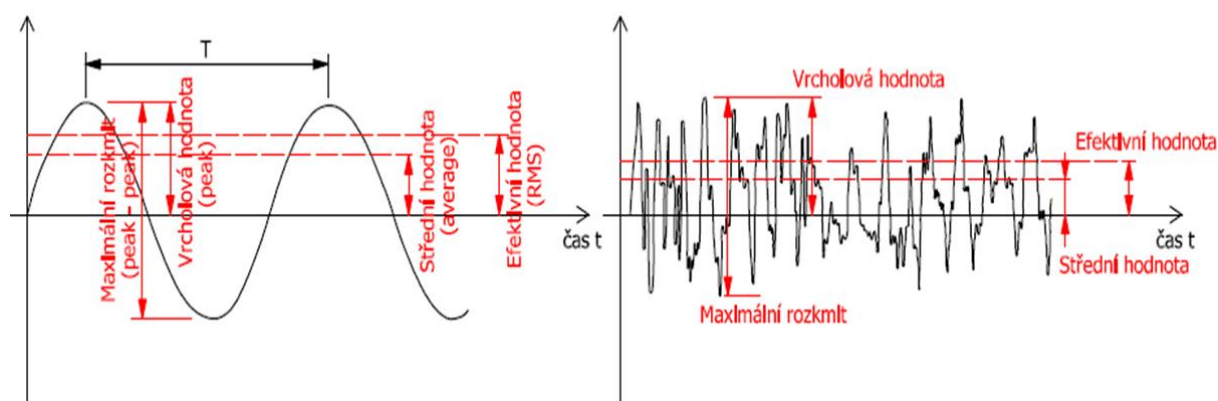
- **maximální (minimální) amplituda (peak)**, která indikuje pouze přítomnost špičky, ale neukazuje na časový průběh ani frekvenční složení hodnoceného signálu
- **maximální rozkmit (peak-peak)**
- **střední hodnota (average)**, která se získá zprůměrováním absolutních hodnot časového průběhu signálu.

Praktický význam střední hodnoty je značně omezen tím, že nemá přímý vztah k žádné důležitější fyzikální veličině.

- **efektivní hodnota (RMS = Root Mean Square)**, která je z hlediska kvantitativního hodnocení amplitud mechanického kmitání nejdůležitější hodnotou. Ukazuje jeho časový průběh a současně má přímý vztah k jeho energetickému obsahu, a tedy je i měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti mechanického kmitání

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2(t) \cdot dt} \quad (7)$$

kde T je perioda, $x(t)$ je signál v časové rovině. [13]



Obr. 4.2.1 Popis signálu v časové oblasti [14]

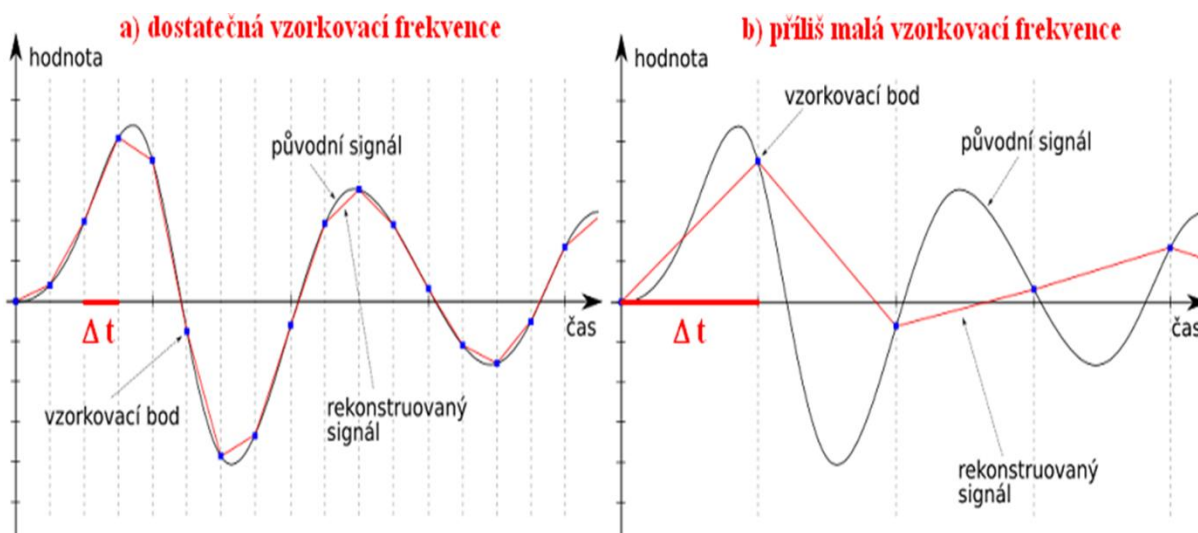
4.3 Vzorkování signálu

Vzorkování (diskretizace) signálu je proces přeměny spojitého signálu na posloupnost diskretních číselných hodnot. Spočívá v tom, že se měří okamžité hodnoty spojitého signálu v určitých pravidelných časových intervalech. Pokud je časový interval Δt , po kterém měřená data snímáme, konstantní, pak je vzorkování periodické a tento interval Δt nazýváme periodou vzorkování. Z toho pak vyplývá vzorkovací frekvence f_{vz} .

$$f_{vz} = \frac{1}{\Delta t} [Hz] \quad (8)$$

Vzorkovací frekvence musí být nejméně dvakrát větší než maximální frekvence f_{max} obsažená v měřeném signálu (Shannon – Kotělnikovův vzorkovací teorém), a to proto, aby bylo možné z naměřených hodnot zpětně rekonstruovat původní signál (obr. 4.3.1).

$$f_{vz} \geq 2 \cdot f_{max} \quad (9)$$



Obr. 4.3.1 Rekonstrukce signálu při dostatečné vzorkovací frekvenci (odpovídá původnímu signálu) a při nedostatečné vzorkovací frekvenci (rekonstruovaný signál neodpovídá původnímu) [14]

Pokud vzorkovací frekvence nebude dostatečně velká, dojde k tzv. aliasing efektu, jehož důsledkem je, že navzorkovaný signál je zkreslený, tedy neodpovídá původnímu.

Vzorkovací frekvenci $f_{vz}/2$ nazýváme Nyquistovou frekvencí. Vzorkování signálu Nyquistovou frekvencí větší než je maximální frekvence obsažená v signálu zajistí, že aliasing efekt nenastane. Pro Nyquistovu frekvenci tedy platí vztah [14]:

$$f_{Nyq} \approx \frac{f_{vz}}{2} \quad (10)$$

4.4 Popis signálu ve frekvenční oblasti

Frekvenční analýza je založena na matematickém teorému, že každá křivka může být určena jako součet sinusových křivek, které jsou harmonickými složkami daného průběhu:

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega t + \varphi_2) + \dots \quad (11)$$

Pomocí transformace signálu do frekvenční roviny jsme schopni zjistit frekvenční obsah, tedy které frekvence se nám v signálu vyskytují. To se nejčastěji provádí pomocí Fourierovi transformace.

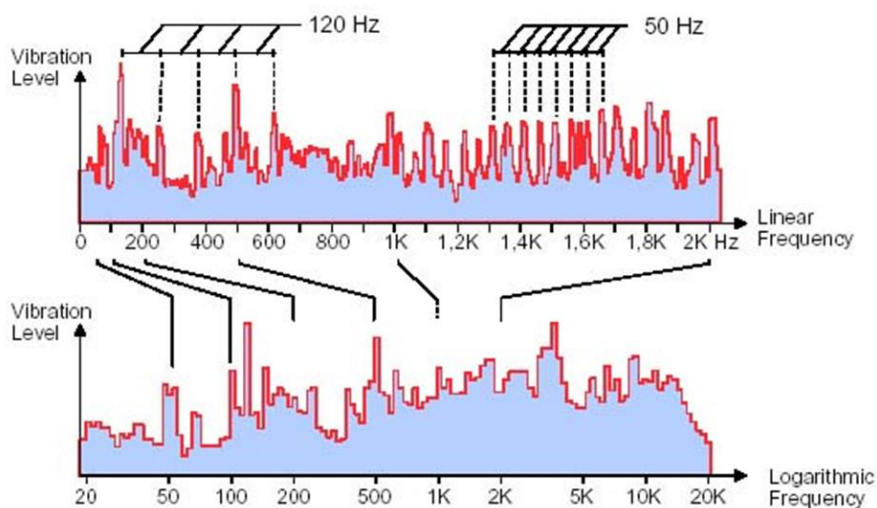
Fourierova transformace patří mezi neparametrické metody, co znamená, že celá analýza se opírá pouze o změřená data. Jedná se však o nejčastější transformaci pro převod

z časové do frekvenční oblasti. Převod z časové do frekvenční oblasti znázorňuje závislost amplitudy kmitání na frekvenci kmitání. Fourierova transformace je definována pro spojitou funkci následující integrální rovnicí [15]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi f t} \cdot dt \quad (12)$$

kde f je frekvence, t je čas, $x(t)$ je signál v časové oblasti a $X(f)$ je jeho reprezentace ve frekvenční oblasti, $i = \sqrt{-1}$

Pro znázornění frekvencí vibrací je možné použít buď lineární stupnici frekvence, která snadno zobrazí harmonické složky signálu, nebo logaritmickou stupnici, která rozšiřuje oblast nízkých frekvencí a současně komprimuje oblast vysokých frekvencí. Výhodou logaritmické stupnice je také možnost znázornění celého pracovního rozsahu na ne příliš dlouhé ose (obr. 4.4.1).



Obr. 4.4.1 Porovnání lineární a logaritmické stupnice frekvence [13]

5. Snímače

5.1 Indukčnostní snímače pro měření pohybů

Základním stavebním prvkem indukčnostního snímače je cívka, která je jako součástka spolehlivá a levná. Při měření se využívá změny magnetického toku cívky, která je reprezentována převodem na elektrický výkon. V takovém případě mluvíme o aktivním měniči. Druhým způsobem je působení mechanické veličiny, která má za následek měnění se hodnoty indukčnosti, v tomto případě se jedná o pasivní převodník. Tyto snímače

se vyrábí pro rozsah posunů 0-2 mm, až do 0-500 mm. Mezi jejich výhody patří jednoduchá konstrukce, robustnost snímačů, jednoduché elektrické zapojení a velký rozsah měřené veličiny. Mezi nevýhody těchto snímačů patří hmotnost pohyblivých částí, závislost výstupního signálu na amplitudě a frekvenci napájecího napětí, požadavek převážně střídavého napětí a teplotní závislosti feromagnetických materiálů a jejich stárnutí. Další velkou nevýhodou těchto snímačů je potřeba vztažného bodu [16].

Měřenou veličinou indukčnostních snímačů je časový průběh výchylky kmitání, co znamená, že není nutné provádět složité výpočty. Navíc, chyba měření využitím této metody je zanedbatelně malá.

5.2. Piezoelektrické snímače pro měření zrychlení vibrací

V dnešní době se jedná o nejrozšířenější snímače zrychlení. Důvod je ten, že tento typ snímače charakterizuje široký pracovní frekvenční a dynamický rozsah, definovaná linearita v těchto rozsazích, pevná a robustní konstrukce, vysoká spolehlivost a dlouhodobá stabilita. Výhodou je i to, že tyto snímače nemají pohyblivé části citlivé k opotřebení a také fakt, že nepotřebují vnější napájecí zdroj. Elektrický výstupní signál těchto snímačů, úměrný zrychlení mechanického chvění, je možno integrovat a získat tak elektrické signály odpovídající rychlosti a výchylce chvění.

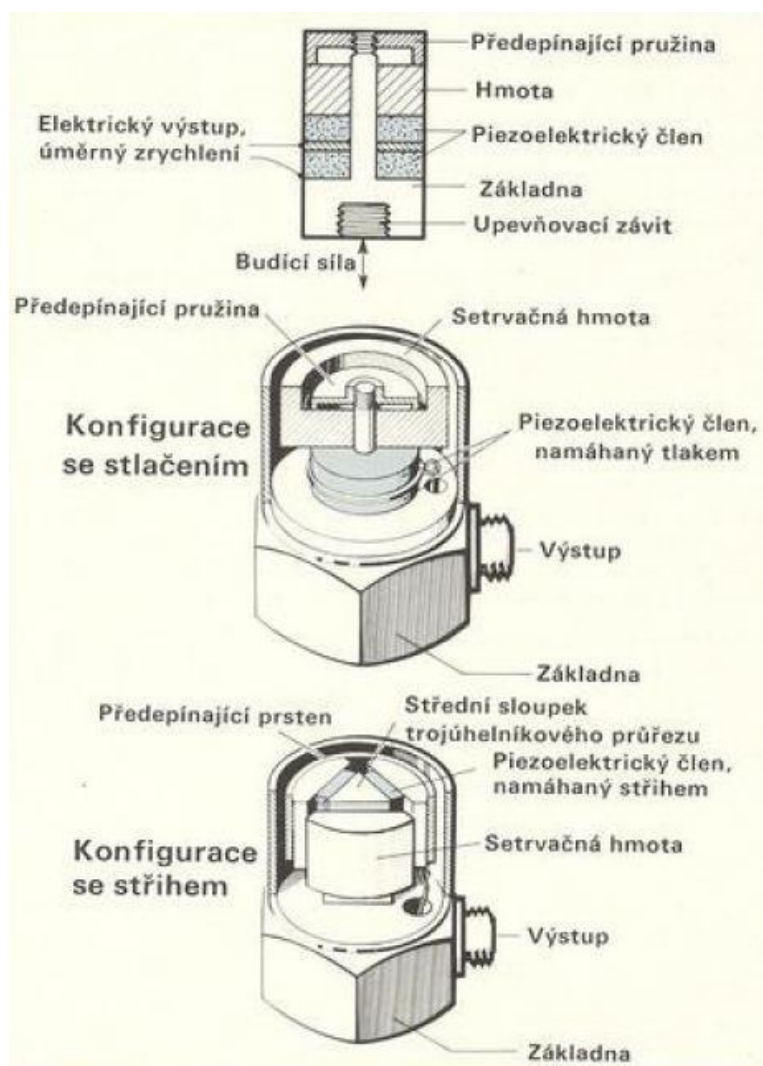
Základním prvkem piezoelektrického snímače zrychlení je výřez z piezoelektrického materiálu, zpravidla z umělé polarizované piezoelektrické keramické hmoty, vykazující výrazný piezoelektrický jev. Podstatou tohoto jevu je vznik elektrického náboje na čelních stěnách výřezu z piezokeramiky při jeho mechanickém namáhání v tahu, tlaku či stříhu. Vznikající elektrický náboj je úměrný mechanické síle.

U snímačů používaných v praxi je piezoelektrický člen konstruován a umístěn tak, že při kmitavém pohybu snímače na něj působí síla úměrná zrychlení přídavné hmoty. Toto uspořádání odpovídá Newtonovu zákonu, podle nějž je síla rovna součinu hmoty a zrychlení [17].

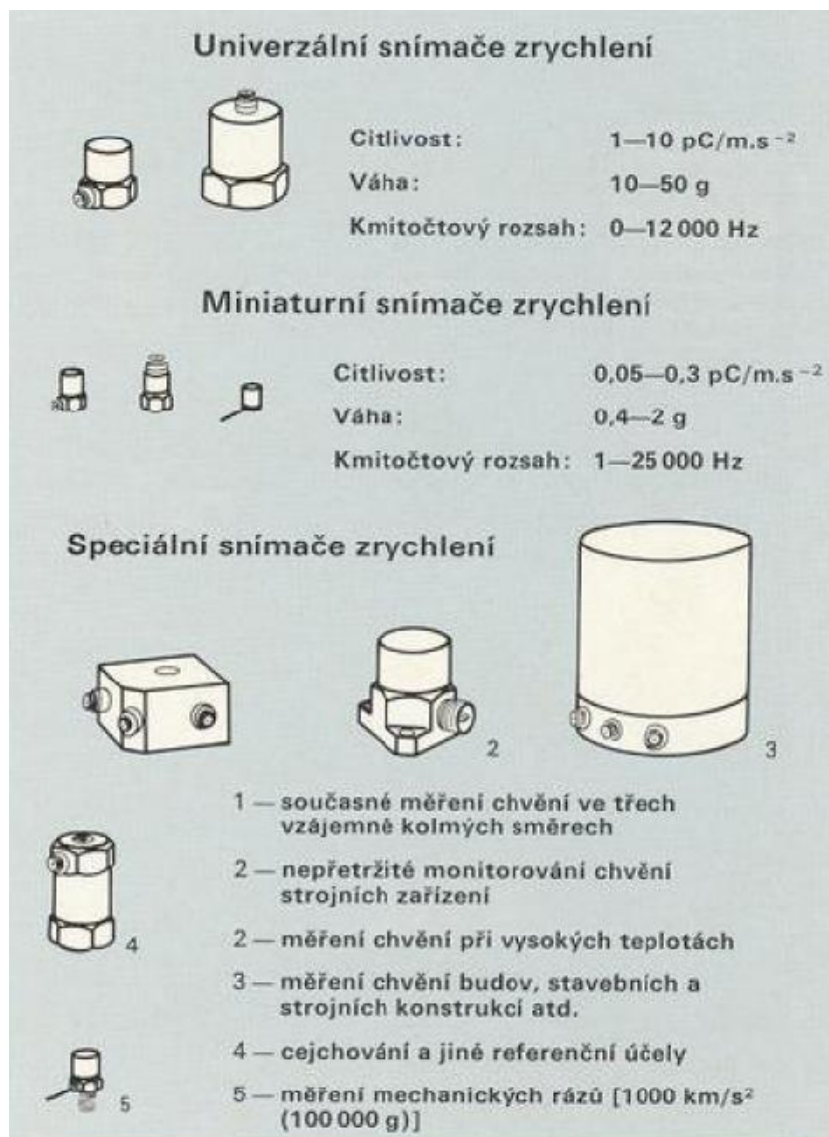
Charakteristiky snímačů jsou často přizpůsobeny určitým oblastem použití. Snímače zrychlení s malými rozměry jsou zpravidla určeny k měření chvění s velkými amplitudami a vysokými kmitočty, váha těchto snímačů se pohybuje okolo 0,5 až 2 g. Jiné speciální snímače jsou určeny k současnému měření zrychlení ve třech navzájem kolmých směrech, práci při vysokých teplotách, měření velmi malých amplitud chvění, měření silných mechanických rázů, cejchování jiných snímačů, atd. [17].

Nejvhodnější frekvenční rozsah a optimální citlivost k měření vibrací od kolejové dopravy mají universální a speciální třísové snímače, čímž se jeví jako nejvhodnější pro taková měření.

Citlivost snímače je jedním z jeho nejdůležitějších parametrů. Ideální by byl snímač, který generuje co největší elektrický signál již při poměrně malých zrychleních vibrací, ale zde je nutný kompromis, protože vysoká citlivost snímače znamená také použití velkého piezoelektrického členu a tím i velkého snímače a to jak rozměrově tak i hmotností. Platí tedy, že snímače s vysokou citlivostí jsou rozměrově větší a proto se tyto typy používají spíše pro měření vibrací na budovách. Ve většině případů však citlivost snímače není kritická, protože moderní předzesilovače umožňují zpracování i velmi slabých elektrických signálů [17].



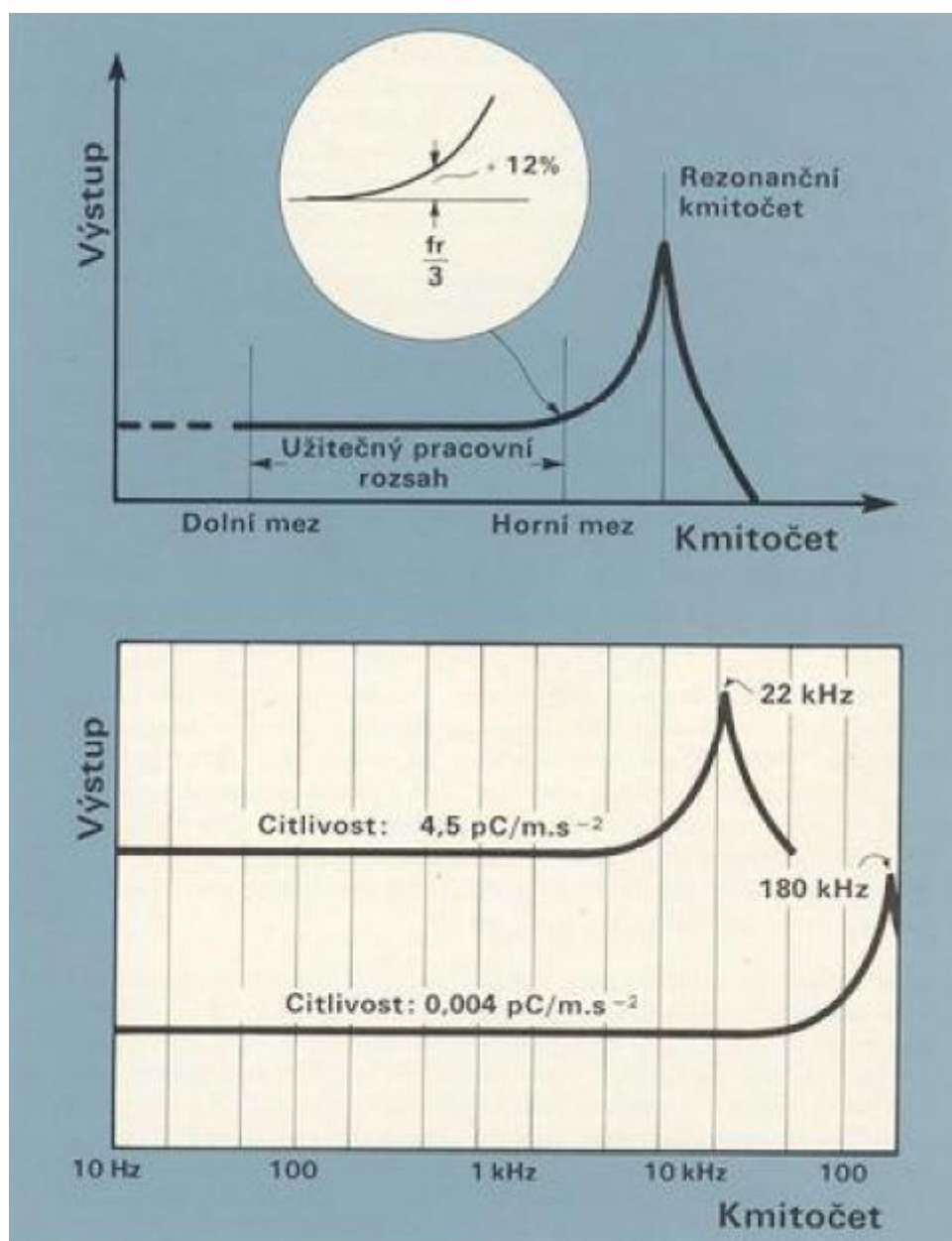
Obr. 5.2.1 Konstrukce piezoelektrických snímačů zrychlení [17]



Obr. 5.2.2 Typy piezoelektrických snímačů zrychlení [17]

Při výběru vhodného snímače je rovněž nutné věnovat pozornost pracovnímu frekvenčnímu rozsahu použitého snímače, aby jeho pracovní rozsah pokrýval celou škálu kmitočtů, které chceme měřit. Kmitočtový rozsah, v němž snímač zrychlení pracuje jako přesný lineární měnič, je v oblasti nízkých kmitočtů omezen dvěma faktory. Prvním je dolní mezní frekvence předzesilovače, k němuž je snímač připojen. Toto omezení zpravidla nečiní praktické potíže, protože dolní mez většiny kvalitních předzesilovačů leží hluboko pod 1 Hz. Druhým omezujícím faktorem je vliv změn teploty prostředí, k nimž jsou piezoelektrické snímače zrychlení citlivé. Současné snímače zrychlení, jejichž piezoelektrický člen je namáhán stříhem, se vyznačují malou citlivostí ke změnám teploty a při normálních teplotách mohou být úspěšně použity k měření vibrací s frekvencí menší než 1 Hz. Horní mez pracovního frekvenčního rozsahu snímačů zrychlení je určena vlastní

rezonanční frekvenci celého systému, tedy hmoty a pružiny [17]. Z praktického hlediska je vhodné používat snímač asi do 2/3 jeho frekvenčního rozsahu.



Obr. 5.2.3 Citlivost a pracovní frekvenční rozsah snímačů zrychlení [17]

6. Návrh metodiky měření

Měření a vyhodnocování dynamických účinků působících na výhybky a výhybkové konstrukce je problematika, která dosud nemá žádné komplexní řešení, takže se nám nabízí pro měření a srovnávání naměřených dat hned několik možností. Ve své práci se budu zabývat měřením pohybového chování konstrukce výhybky pod zatížením kolejovými

vozidly, přenosem vibrací konstrukcí a také budu sledovat napjatost na patě křídlové kolejnice.

Jedním z cílů mé práce je experimentálně ověřit a popsat vliv geometrie přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky na dynamické účinky. K tomuto účelu poslouží níže popsaná metodika měření (znázorněna na obr. 6.2.1) spolu s měřením geometrie přechodu pomocí laserového profiloměru.

Metodika měření je složena ze dvou dílčích částí. První se zabývá dynamickým chováním konstrukce a sleduje přenos vibrací z kolejnic do pražce a do šterkového lože. Druhá část je navržena tak, aby umožnila sledovat pohybové chování konstrukce pod zatížením.

6.1 Sledování šíření vibrací u výhybkových konstrukcí

Asi nejzajímavější, z hlediska analýzy a vyhodnocení, bude sledování přenosu zrychlení vibrací, způsobených pojezdem dvojkolí, ze srdcovky výhybky přes pražec až do kolejového lože. Lze předpokládat, že část vibrací (velmi malá) bude utlumena samotnou kolejnicí (srdcovkou) a pryžovými podložkami, další část vibrací utlumí pražec a neztlumená část se přes tento mechanismus přenesení do šterkového lože. Pro měření veličin charakterizujících dynamické účinky se po zkušenostech z měření provedených Ústavem železničních konstrukcí a staveb VUT FAST v Brně jeví jako nejvhodnější použití piezoelektrických snímačů zrychlení vibrací (na obr. 6.2.1 jsou označeny písmenem A).

Snímač umístěný na patě křídlové kolejnice je tříosý snímač typu 4524 B001, který bude sledovat velikost dynamického rázu, který působí na srdcovku výhybky (A4Z, A5X, A6Y) Ve svislém směru (A4Z) se zachytí velikost svislé složky dynamického rázu na srdcovku, resp. ta část, která bude přenesena do paty křídlové kolejnice. V podélném směru (A5X) se zachytí velikost podélné složky dynamického rázu přenesené do paty křídlové kolejnice a v příčném směru (A6Y) je dvojkolí vedeno pomocí přídržnice, takže boční rázy na srdcovku jsou velmi malé, přesto je zajímavé tuto složku sledovat už jen z pohledu plynulosti průjezdu vlakové soupravy výhybkou, proto je v rámci navržené metodiky tato složka rovněž sledována.

Další snímače jsou umístěny tak, aby bylo pokryto co nejlépe šíření dynamického rázu ze srdcovky výhybky přes pražec až do šterkového lože. Umístění snímačů je následující:

A3Z – na pražci pod hrotem srdcovky

A0Z – na tzv. měřicí tyči, která je zapuštěna do šterkového lože v blízkosti hrotu srdcovky
(viz schéma umístění snímačů – obr. 6.2.1)

Přenos vibrací pražcem budou sledovat tyto snímače:

A1Z – za hlavou pražce v přímé větvi

A2Z – v ose přímé větve

A4Z – na patě křídlové kolejnice v přímé větvi

A7Z – v ose odbočné větve

A8Z – za hlavou pražce v odbočném směru

Zajímavé bude, jak je pražec v jednotlivých místech dynamicky namáhán, i to, jak se dynamické rázy projeví po délce pražce. Snímače umístěné v ose koleje nám nabízí představu o tom, jak velká část dynamického zatížení se přenesla pražcem až do osy koleje. Akcelerometry umístěné na hlavě pražce zas umožní sledovat, jak dobře je tu pražec podepřen. Důvodem zájmu je skutečnost, že se pod pražcem v oblasti srdcovky a v menším měřítku i za hlavami pražců často vytvoří volné prostory. Pražec je pak podepřen především v ose kolejí.

Díky výše uvedené metodice bude možné získat kompletní informaci o tom, jak se šíří dynamický ráz v blízkém okolí hrotu srdcovky a jak se přenáší do šterkového lože.

6.2 Měření pohybového chování konstrukce

Sledování pohybového chování podél srdcovky výhybky v oblasti srdcovky bude realizováno pomocí měření svislých posunutí jednotlivých pražců podél srdcovky výhybky indukčnostními snímači délek (na obr. 6.2.1 označeny písmenem S). Přesněji se jedná o snímače S0 (na pražci 17-076), S1 (na pražci 17-077), S4 (na pražci 17-078), S7 (na pražci 17-080), viz schéma umístění snímačů. Výsledkem bude graf svislých pohybů pražců pod zatížením kolejovými vozidly v čase. Maximální průhyb je očekáván u pražce přímo pod srdcovkou.

Dále budou změřena svislá posunutí nejvíce namáhaného pražce 17-078 (pod hrotem srdcovky) vůči pláni tělesa železničního spodku, rovněž použitím indukčnostních snímačů, v tomto případě se jedná o snímače:

S2, S6 - umístěné za hlavami pražce

S3 – umístěn v ose přímé větve

S4 – umístěn v blízkosti hrotu srdcovky v přímé větvi

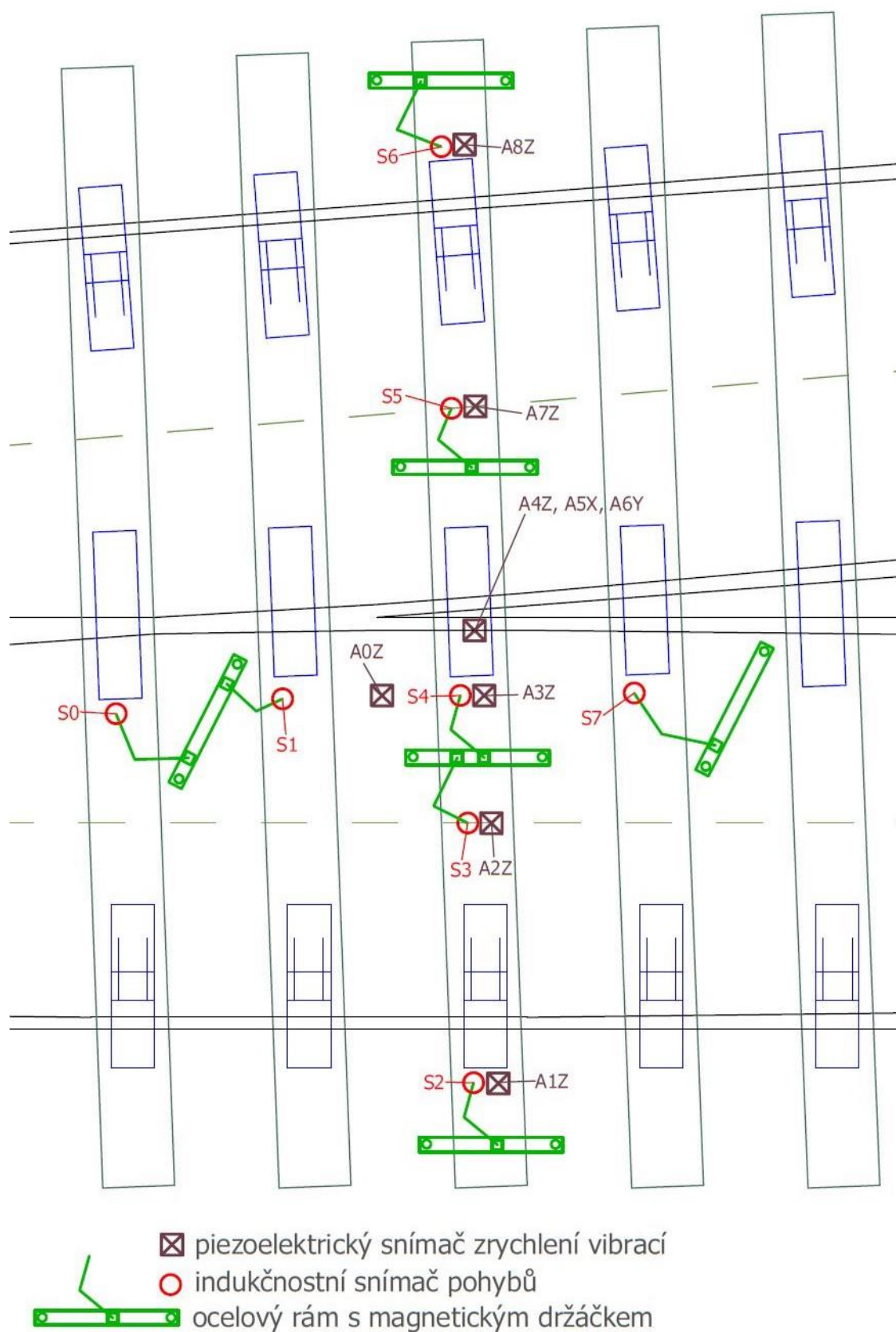
S5 – umístěn v ose odbočné větve

Výstupem tohoto měření bude graf svislých pohybů pražce. Měření se budou realizovat při přejezdu soupravy přímou větví výhybky, která je pojížděna plnou traťovou rychlostí.

Všechny snímače posunů jsou typu WA-10 T, celkem je použito 8 kusů.

Snímače pohybů pražce (S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7) budou uchyceny pomocí speciálních magnetických držáků k rámu. Rám tvoří dvě ocelové tyče délky 80 cm a průměru 20 mm zatlučené do kolejového lože a ocelový nosník délky 70 cm. Osová vzdálenost mezi tyčemi je 60 cm, v kolejovém loži jsou zatlučeny do hloubky 65 cm.

Pokud se výhybkou jezdí převážně v přímém směru a odbočný směr není příliš vytížen, může dojít i k nežádoucímu převýšení výhybkového pražce, případně k jeho nadzvedávání při průjezdu vozidla. Díky rozmístění snímačů bude možnost všechny tyto jevy zachytit.



Obr. 6.2.1 Schematický náčrtek metodiky měření

7. Matematický aparát

Při měření dynamických účinků od kolejových vozidel přímo in-situ, je třeba popsat a vyhodnotit stochastický signál, což je poměrně obtížné. Abychom byli schopni získat potřebné informace a porovnat mezi sebou dynamické účinky na jednotlivých konstrukcích, je výhodné hodnotit jej ve třech pomyslných rovinách. První je rovina časová, kde se budou hodnotit maximální a minimální hodnoty obsažené v měřeném signálu a především efektivní hodnota (často se užívá označení RMS, což je zkratka Root Mean Square). V časové oblasti se získá ze signálu informace, ve kterém časovém okamžiku se vyskytují maxima a minima (na které nápravě, případně kole vlaku) a také je možné získat představu o celkovém energetickém působení vlaku na konstrukci (klouzavá RMS). Pro podrobnou analýzu dynamických účinků je to však informace nedostačující, neboť není známé frekvenční složení. Z tohoto důvodu je vhodné použití převodu signálu z roviny časové do roviny frekvenční. Tento převod lze provést pomocí metod založených převážně na Fourierově transformaci. Ve frekvenční rovině je možné provést analýzu, jaké frekvenční složky jsou v signálu nejvýraznější. Pro podrobný rozbor je vhodné použít ještě třetí rovinu vyhodnocení, a to rovinu časově-frekvenční. V této rovině je možné sledovat nejen frekvenční složení signálu, ale také výskyt frekvenčních složek v čase. V následující části je popsán použitý matematický aparát.

7.1 Efektivní hodnota zrychlení vibrací

Hodnota RMS je z hlediska hodnocení vibrací v časové oblasti nejdůležitější parametr, protože zahrnuje dobu působení vibrací, a zároveň má přímý vztah k jeho energetickému obsahu. Je tedy měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti vibrací. Efektivní hodnota zrychlení vibrací je definována dle vztahu [18].

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) \cdot dt}, \quad (7)$$

kde $a(t)$ je okamžitá hodnota zrychlení, T doba, pro kterou je třeba efektivní hodnotu určit.

7.2 Fourierova transformace

Fourierova transformace patří mezi neparametrické metody, to znamená, že celá analýza se opírá pouze o změřená data. Jedná se však o nejčastější transformaci pro převod z časové do frekvenční oblasti. Fourierova transformace je definována pro spojitou funkci následujícími integrálními rovnicemi. Pro přímou transformaci platí vztah [15]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot dt, \quad (12)$$

kde f je frekvence, t je čas, $x(t)$ je signál v časové oblasti a $X(f)$ je jeho reprezentace ve frekvenční oblasti, j je imaginární jednotka.

7.3 Welchova metoda

Welchova metoda je jistou modifikací algoritmu rychlé Fourierovy transformace. Digitalizovaný signál $x[n]$ ($n=0,1,2,\dots, N-1$) je rozdělen na K segmentů, každý o délce M vzorků ($xi[m]$, $i=0,1,\dots, k-1$, $m=0,1,\dots,M-1$). Segmenty jsou umístěny buď těsně vedle sebe, pak $N=K \cdot M$, nebo se mohou překrývat. Každý segment je vážen příslušnou okénkovou funkcí $w[m]$. Po transformaci a následném výpočtu kvadrátu modulu vzniknou dílčí periodogramy $S_j[k]$. Tyto vytvoří po zprůměrování výsledný vyhlazený odhad spektrální hustoty $S[k]$. Tento odhad lze popsat následujícími vztahy. Dílčí periodogram je určen vztahem [15].

$$S_j[k] = \frac{1}{U \cdot M} \cdot \left| \sum_{m=0}^{M-1} x[m + i \cdot M] \cdot w[m] \cdot e^{\left(\frac{-j2\pi mk}{M}\right)} \right|^2, \quad (13)$$

kde

$$U = \frac{1}{M} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} w^2[m] \quad (14)$$

je norma vektoru okénkové funkce, $w[m]$ je okénková funkce. Výsledný vyhlazený odhad se získá zprůměrováním dílčích periodogramů

$$\hat{S} = \frac{1}{K} \cdot \sum_{i=0}^{K-1} S_j[k]. \quad (15)$$

7.4 Krátkodobá (okénková) Fourierova transformace (STFT)

STFT (Short Time Fourier Transform) lokalizuje frekvenční složky v čase s konstantním (lineárním) rozlišením. Základním principem je rozdělení signálu na dostatečně malé realizace, u nichž je možno předpokládat dostatečnou stacionaritu. To je provedeno multiplikací jisté okénkové funkce na signálu. Na každém takovém výřezu je provedena Fourierova transformace (FT). Okénko se posouvá v čase. STFT poskytuje kompromis mezi časovou a frekvenční reprezentací signálů [15]. Její definiční integrál je:

$$STFT_X^{(\omega)}(t', f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) \cdot g^*(t - t')] \cdot e^{-i2\pi f(t - t')} \cdot dt, \quad (16)$$

kde g je okénková funkce, $*$ komplexní konjunkce, t' časové posunutí okénka, $x(t)$ je časová reprezentace signálu a $STFT_X^{(\omega)}(t', f)$ je jeho časově-frekvenční reprezentace [15].

8. Popis měření

8.1 Popis měřicí lokality a vybraných výhybek

Vybranými výhybkami pro tuto práci jsou výhybka č.59 (srdcovka z roku 2009) a výhybka č. 63 (srdcovka z roku 2012) na pardubickém zhlaví žst. Choceň. Obě konstrukce jsou součástí jednoduché kolejové spojky, soustavy železničního svršku UIC 60, na betonových pražcích, s upevněním Vossloh Skl 24. Obě jsou pojížděny proti hrotu, s úhlem odbočení 1:14 a poloměrem odbočení 760 m, typ výhybek je J60-1:14-760-zlp,L,p,ČZP,b,KS,ZPT. Mají stejné srdcovky od stejného výrobce Bari Fonderie Meridionali. Výrobce výhybek je DT - Výhybkárna a strojárna, a.s.

Na obr. 15 je fotografie měřicí lokality, kde je rovněž detail srdcovky výhybky č. 59 s kontaktně únavovou vadou. Výhybka č. 59 byla dle vizuální prohlídky v horším stavu, což potvrdilo i měření laserovým profiloměrem a přesná nivelace.



Obr. 8.1.1 Pohled na lokalitu měření a detail srdcovky výhybky č. 59

8.2 Měření laserovým profiloměrem

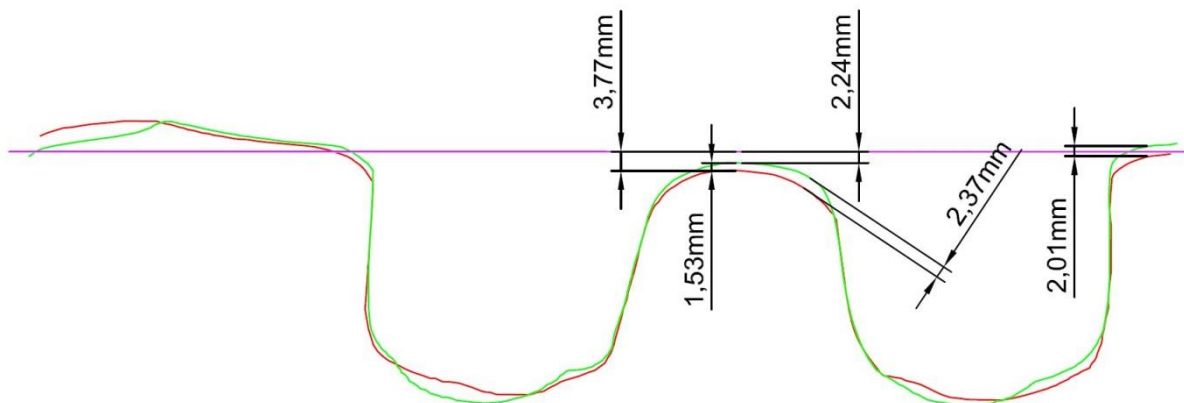
Dne 4. 3 2013 proběhlo na obou vybraných výhybkách měření laserovým profiloměrem KPJ01 – Kontura (obrázek 8.2.1). Laserový profiloměr změřil příčné profily srdcovky po 2,5 mm. Před samotným měřením se výhybky nastříkaly bílou křídou ve spreji, aby se laser dobře a rovnoměrně odrážel od povrchu kolejnic (obrázek 8.2.2). Do matematického bodu křížení se umístil magnet, podle kterého se profiloměr orientoval a odčítal délky. Výsledkem měření byly jednotlivé příčné profily (řezy) srdcovkou. Vybrala jsem profil v místě, kde kolo přechází z křídlové kolejnice na hrot srdcovky (asi 400 mm od matematického bodu křížení). Ten jsem převedla do formátu dwg a porovnála mezi sebou obě výhybky. Porovnání není úplně jednoduché, přestože se jedná o totožné srdcovky od stejného výrobce, přece jen se změnil tvar žlábků, což pouhým okem není možné postřehnout a pro porovnání profilů to má zásadní význam. Přesto jsem se pokusila o porovnání, které je vidět na obrázku 8.2.3.



Obr. 8.2.1 Profiloměr KPJ01 – Kontura při měření na výhybce



Obr. 8.2.2 Výhybka nastříkaná křídou, je připravena k měření



Obr. 8.2.3 Srovnání profilů výhybek v místě přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky

Na obrázku č. 8.2.3 je zelenou barvou profil výhybky č. 63 a červenou barvou profil výhybky č. 59. Je zřejmé, že výhybka č. 59 je přece jen více ojetá a geometrie přechodu je tak lepší na výhybce č. 63.

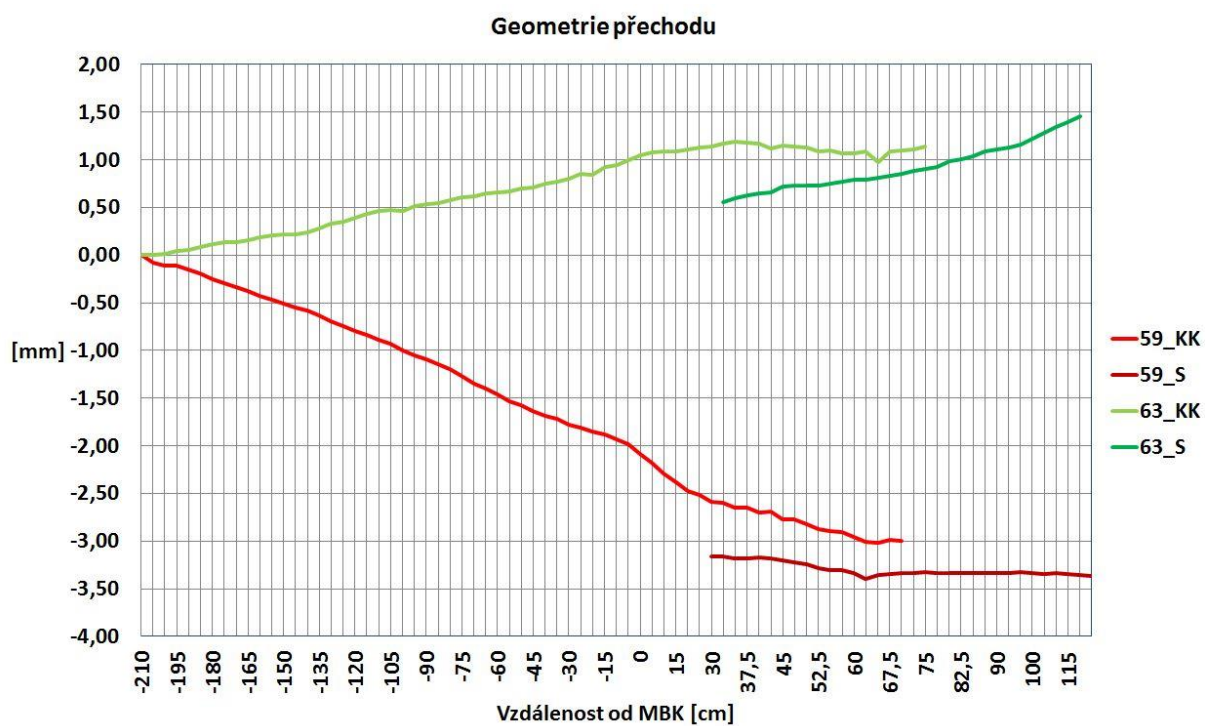
8.3 Přesná nivelace

Dne 11. 5. 2013 jsem spolu s kolegy z Ústavu železničních konstrukcí a staveb provedla přesnou nivelaci křídlové kolejnice a srdcovkového klínu u vybraných výhybek č. 59 a 63. Na kolejnici jsem nejprve rozměřila řezy, které budu měřit (obrázek 8.3.1). Řezy byly od sebe vzdáleny 50 mm a v oblasti, kde kolo přechází z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, byly ještě zhuštěny na 25 mm. Celkem bylo měřeno na obou výhybkách 96 řezů, příčmě v 17 řezích byly měřeny dva body (jak na křídlové kolejnici, tak na hrotu srdcovky). Změřené hodnoty jsem poté vynesla do grafu, abych byla schopna postihnout geometrii přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky (obrázek č. 8.3.2). Nivelace byla provedena nivelačním přístrojem KONI 007.

Při pohledu na graf na obrázku č. 8.3.2 je zřejmé, že výhybka č. 63 má horší geometrii přechodu. Zelenou barvou je na obrázku č. 8.3.2 znázorněn průběh výšek na křídlové kolejnici a srdcovkovém klínu u výhybky č. 63, červenou barvou jsou znázorněny průběhy na výhybce č. 59. Přesná nivelace tedy potvrdila závěry z osobní prohlídky tratě a z měření laserovým profiloměrem.



Obr. 8.3.1 Pohled na rozměření a označení řezů na srdcovce.



Obr. 8.3.2 Graf výškového průběhu křídlové kolejnice a srdcovkového klínu na výhybkách č. 59 a 63

8.4 Měření dynamických účinků

Měření dynamických účinků proběhlo ve dnech 25. 3. a 8. 4. 2013. Samotnému měření předcházela příprava vždy den předem, kdy se zatloukly ocelové tyče, které společně s ocelovým příčником tvoří rám, k němuž byly pomocí magnetických držáků přichyceny indukčnostní snímače dráhy od firmy HBH (typ WA-10 T). Dále se očistila místa, kde byly následně sekundovým lepidlem (pomocí speciálních plastových podložek) přichyceny piezoelektrické akcelerometry od firmy Brüel & Kjær (typy 4507 B001, 4507 B004 a tříosý 4524 B001). Všechny snímače byly zapojeny do měřicí ústředny DEWE-2502 od firmy Dewetron (viz fotodokumentace v Příloze L). Přehledně je zapojení do ústředny DEWE-2502 uvedeno v tabulce č. 8.4.1. Rychlost projíždějících souprav byla měřena pomocí ručního radaru od firmy Bushnell. Soupis všech změřených vlaků je v tabulkách č. 8.4.2 a 8.4.3.

Parametry měřená byly následující:

- Vzorkovací frekvence: 10kHz
- Dolní propust: 1kHz
- Horní propust: 3Hz (ve šterku 0,3Hz)
- Počet měřených kanálů: 17 (8 – pohyby, 9 – vibrace)
- Počet měřicích dnů: 2 (25. 3. 2013 – výhybka č. 59)
(8. 4. 2013 – výhybka č. 63)
- Počet změřených vlaků: 20 (výhybka č. 59)
26 (výhybka č. 63)

Kanál v DEWE-2502 fyzicky / port	Označ. kanálu	Umístění snímače	Typ snímače
1 / CH 0	S0	Na pražci u srdcovky (dva pražce před hrotem srdcovky) v přímém směru	WA-10 T
2 / CH 1	S1	Na pražci u srdcovky (jeden pražec před hrotem srdcovky) v přímém směru	WA-10 T
3 / CH 2	S2	Na hlavě pražce pod hrotem srdcovky v přímém směru	WA-10 T
4 / CH 3	S3	Na pražci pod hrotem srdcovky v ose koleje v přímém směru	WA-10 T
5 / CH 4	S4	Na pražci pod hrotem srdcovky	WA-10 T
6 / CH 5	S5	Na pražci pod hrotem srdcovky v ose koleje v odbočném směru	WA-10 T
7 / CH 6	S6	Na hlavě pražce pod hrotem srdcovky v odbočném směru	WA-10 T
8 / CH 7	S7	Na pražci u srdcovky (jeden pražec za hrotem srdcovky) v přímém směru	WA-10 T
16 / CH 0	A0Z	Ve šterkovém loži na ocelové tyči u hrotu srdcovky v přímém směru	4507 B004
17 / CH 1	A1Z	Na hlavě pražce pod hrotem srdcovky v přímém směru	4507 B001
18 / CH 2	A2Z	Na pražci pod hrotem srdcovky v ose koleje v přímém směru	4507 B001
19 / CH 3	A3Z	Na pražci pod hrotem srdcovky	4507 B001
20 / CH 4	A4Z	Na patě křídlové kolejnice u hrotu srdcovky v přímém směru	4524 B001
21 / CH 5	A5X		
22 / CH 6	A6Y		
23 / CH 7	A7Z	Na pražci pod hrotem srdcovky v ose koleje v odbočném směru	4507 B001
24 / CH 8	A8Z	Na hlavě pražce pod hrotem srdcovky v odbočném směru	4507 B001

Tab. 8.4.1 Přehled zapojení jednotlivých snímačů do měřicí ústředny DEWE-2502, jejich typ, označení a umístění na výhybce.

Měření Choceň 25.3.2013 - výhybka č. 59					
měření č.	čas	rychlost [km/h]	souprava	nezapojeno	poznámky
1	-	-	-	A0, A8Z	-
2	12:25	138	363	A0Z, A8Z chybně	-
3	12:35	152	Leo Express	A0Z, A8Z chybně	-
4	12:41	94	362	-	-
5	12:44	51	163	-	-
6	12:48	33-36	242 nákladní vlak	-	rozjžděl se
7	13:12	140	182 Taurus	-	-
8	13:19	72	471 City Elefant	-	odbočka po hrotu
9	13:24	161	380	-	-
10	13:29	163	680 Pendolino	-	-
11	13:39	83	150	-	3 vagony
12	14:00	120	380	-	-
13	14:08	139	163 Regio Jet	-	-
14	14:10	67	PKP EM57	-	-
15	14:21	120	151	-	-
16	14:24	156	Leo Express	-	-
17	14:27	33-41	242 nákladní vlak	-	rozjžděl se
18	14:40	88	362 R	-	-
19	14:42	61	163 Os	-	-
20	14:43	38-40	363 nákladní vlak	-	rozjžděl se, bez lokomotivy

Tab. 8.4.2 Soupis změřených vlaků na výhybce č. 59

Měření Choceň 8.4.2013 - výhybka č. 63					
měření č.	čas	rychlost [km/h]	souprava	nezapojeno	poznámky
1	10:44	151	151		-
2	10:48	160	680 Pendolino		-
3	10:56	80	181 nákladní vlak		-
4	11:09	150	350		-
5	11:23	90	363		-
6	11:41	152	151	-	-
7	11:50	80	Ř.V. 80 + 163	-	-
8	11:59	145	Taurus 182	-	-
9	12:06	93	363 nákladní vlak	-	-
10	12:11	68	MVTV+prac. stroje	-	-
11	12:22	107	150	-	-
12	12:34	128	363	-	-
13	12:44	130	151	-	-
14	12:49	141	380	-	-
15	13:08	160	350	-	-
16	13:26	122	471	-	-
17	13:29	69	362	-	do odbočky
18	13:44	156	151	-	-
19	13:46	154	Leo Express	-	-
20	14:02	153	380	-	-
21	14:14	116	163	-	-
22	14:18	43	742	-	do odbočky
23	14:24	117	150	-	-
24	14:32	133	163 RegioJet	-	-
25	14:38	162	380	-	-
26	14:43	161	680 Pendolino	-	-

Tab. 8.4.3 Soupis změřených vlaků na výhybce č. 63

9. Vyhodnocení naměřených dat

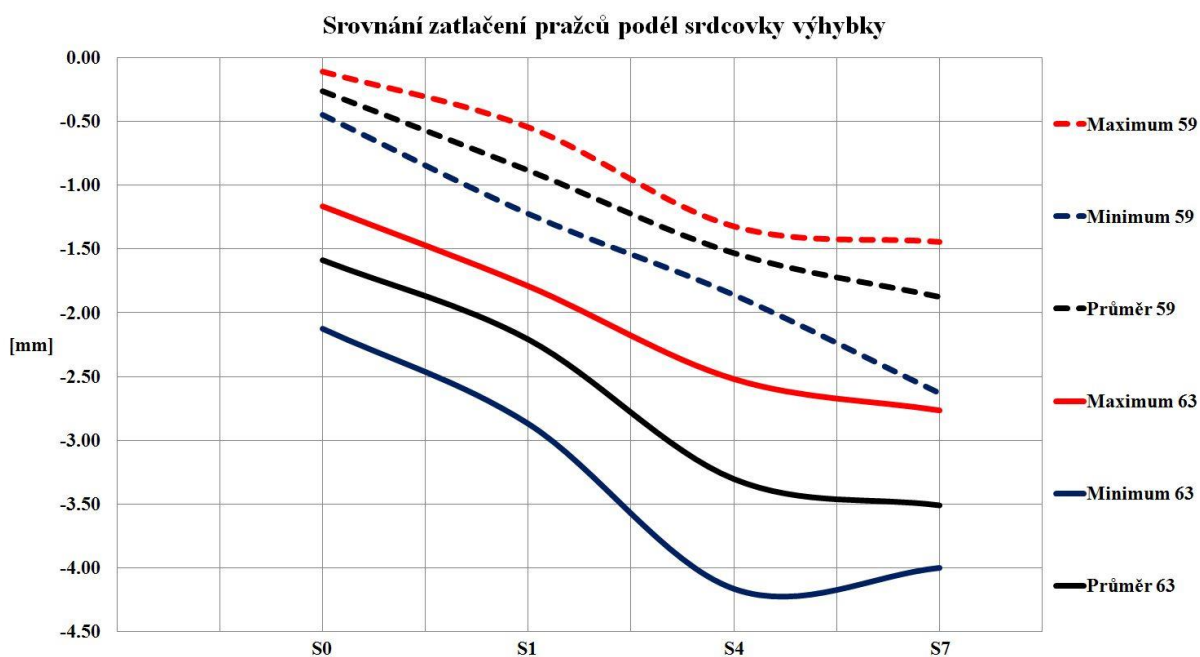
9.1 Vyhodnocení pohybového chování pražců

Na obou konstrukcích jsem pro každý vlak a každý snímač vykreslila časový průběh pohybů pražce v daném místě (příloha A a B). Pro každý vlak jsem poté odečetla minimální a maximální hodnoty na všech snímačích. Minimální hodnoty (záporné hodnoty) odpovídají maximálnímu zatlačení pražce a maximální hodnoty (kladné hodnoty) odpovídají zdvihům pražce. Tyto minimální a maximální hodnoty jsem zanesla do tabulek č. 9.1.1 až 9.1.8 a také jsem z těchto hodnot sestavila "průhybové" křivky pro pražec pod srdcovkou (obrázek č. 9.1.2 a Příloha E) a pro pražce po délce srdcovky (obrázek č. 9.1.1 a Příloha E).

Pokud se podíváme na tabulku č. 9.1.1 až 9.1.4, kde jsou vyneseny maximální zatlačení pražců, pak uvidíme, že ucelené jednotky typu 680 Pendolino, Leo Express a 471 City Elephant mají hodnoty většinou nižší, než je průměr pro dané místo. Naopak vlaky vedené těžkými lokomotivami, které navíc přes měřené výhybky projížděli plnou traťovou rychlostí, například vlak č. 4, 6, 13, 14, 15, 18, 20, 24 a 25 na výhybce č. 63 a vlak č. 1, 2, 7, 9, 12 a 13 na výhybce č. 59 vykazují větší zatlačení pražců, tato skutečnost je dobře na obrázku č. 9.1.3 v Přílohách C a D. Maximálních zatlačení je dosaženo pod nápravami lokomotivy. U vlaků, které přes měřené výhybky přejížděli velmi pomalu, jako je například vlak č. 7, 17 a 22 na výhybce č. 63 a vlak č. 5, 6, 14, 17, 19 a 20 na výhybce č. 59 jsou zatlačení nejnižší. Z výše uvedeného lze vyslovit hypotézu, že z hlediska pohybového chování konstrukce výhybky pod zatížením závisí nejen na hmotnosti na nápravu dané vlakové soupravy, ale také na rychlosti, která také ovlivňuje hodnotu zatlačení pražce. Těžké nákladní vlaky č. 6 a 17 na výhybce č. 59 vykazují poměrně nízké hodnoty zatlačení pražců, oproti hodnotám zatlačení, způsobených průjezdem lokomotivy řady 380, vlak č. 9 a 12 na výhybce č. 59.

Souprava	Vlak č.	Výhybka	Max. hodnoty zatlačení pražců [mm]				Rychlost [km/h]
			S0	S1	S4	S7	
-	1	59	-0.20	-0.83	-1.67	-2.63	-
363	2	59	-0.37	-1.12	-1.61	-	138
Leo Express	3	59	-0.35	-0.84	-1.38	-1.71	152
362	4	59	-0.27	-1.00	-1.57	-1.69	94
163	5	59	-0.17	-0.93	-1.57	-1.60	51
242 nákladní vlak	6	59	-0.16	-0.62	-1.41	-1.77	33-36
Taurus 182	7	59	-0.45	-0.81	-1.34	-2.19	140
471 City Elefant	8	59	-0.21	-1.21	-1.45	-1.54	72
380	9	59	-0.28	-1.22	-1.66	-2.42	161
680 Pendolino	10	59	-0.36	-0.93	-1.50	-1.84	163
150	11	59	-0.21	-1.00	-1.86	-2.01	83
380	12	59	-0.33	-0.68	-1.53	-2.19	120
163 Regio Jet	13	59	-0.36	-0.97	-1.63	-2.17	139
PKP EM57	14	59	-0.18	-0.78	-1.56	-1.48	67
151	15	59	-0.34	-0.73	-1.60	-1.95	120
Leo Express	16	59	-0.33	-0.86	-1.39	-1.66	156
242 nákladní vlak	17	59	-0.12	-0.79	-1.41	-1.44	33-41
362 R	18	59	-0.29	-0.84	-1.66	-1.84	88
163 Os	19	59	-0.11	-0.96	-1.57	-2.12	61
363 nákladní vlak	20	59	-0.14	-0.55	-1.32	-1.45	38-40
Maximum		59	-0.11	-0.55	-1.32	-1.44	
Minimum		59	-0.45	-1.22	-1.86	-2.63	
Průměr		59	-0.26	-0.88	-1.53	-1.88	

Tab. 9.1.1 Maximální hodnoty zatlačení pražců po délce srdcovky výhybky č. 59



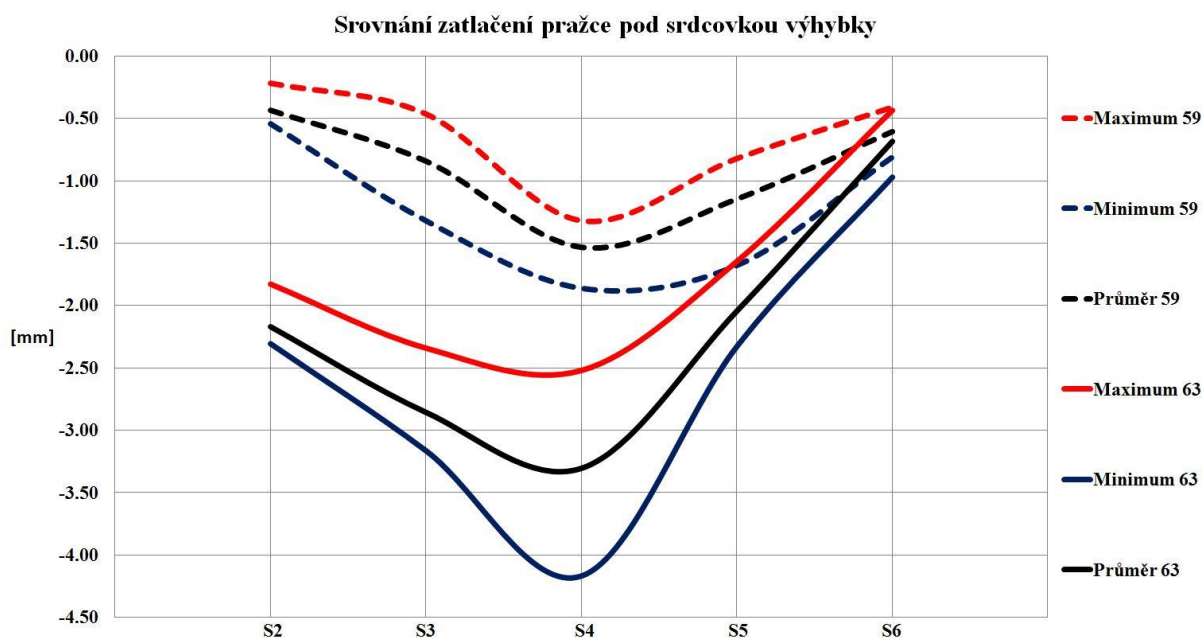
Obr. 9.1.1 Porovnání zatlačení pražce po délce srdcovky výhybky

Souprava	Vlak č.	Výhybka	Max. hodnoty zatlačení pražců [mm]				Rychlost [km/h]
			S0	S1	S4	S7	
151	1	63	-2.13	-2.87	-3.05	-3.36	151
680 Pendolino	2	63	-1.37	-1.82	-2.69	-3.07	160
181 nákladný vlak	3	63	-1.17	-1.81	-3.10	-3.32	80
350	4	63	-1.27	-2.52	-2.95	-3.49	150
363	5	63	-1.33	-1.96	-3.06	-3.60	90
151	6	63	-1.68	-2.85	-3.13	-3.68	152
Ř.V. 80 + 163	7	63	-1.39	-2.19	-3.03	-3.35	80
Taurus 182	8	63	-1.52	-2.03	-3.09	-3.37	145
363 nákladný vlak	9	63	-1.51	-2.18	-3.28	-3.65	93
MVTV+prac. stroje	10	63	-1.32	-1.79	-2.52	-2.77	68
150	11	63	-1.51	-2.03	-3.43	-3.57	107
363	12	63	-1.73	-2.48	-3.33	-3.76	128
151	13	63	-1.66	-2.54	-3.53	-3.94	130
380	14	63	-1.82	-2.47	-3.58	-3.85	141
350	15	63	-1.96	-2.57	-3.93	-3.90	160
471	16	63	-1.60	-2.09	-3.17	-3.38	122
362	17	63	-1.54	-2.06	-3.20	-3.17	69
151	18	63	-1.67	-1.98	-3.64	-4.00	156
Leo Express	19	63	-1.51	-2.13	-3.32	-3.24	154
380	20	63	-1.90	-2.17	-4.17	-3.84	153
163	21	63	-1.62	-2.18	-3.45	-3.85	116
742	22	63	-1.41	-1.94	-2.61	-2.86	43
150	23	63	-1.53	-2.07	-3.29	-3.63	117
163 RegioJet	24	63	-1.52	-2.21	-3.49	-3.80	133
380	25	63	-1.92	-2.26	-4.00	-3.62	162
680 Pendolino	26	63	-1.65	-2.21	-3.85	-3.22	161
Maximum		63	-1.17	-1.79	-2.52	-2.77	
Minimum		63	-2.13	-2.87	-4.17	-4.00	
Průměr		63	-1.59	-2.21	-3.30	-3.51	

Tab. 9.1.2 Maximální hodnoty zatlačení pražců po délce srdcovky výhybky č. 63

Souprava	Vlak č.	Výhybka	Max. hodnoty zatlačení pražce pod srdcovkou [mm]					Rychlost [km/h]
			S2	S3	S4	S5	S6	
-	1	59	-0.47	-1.32	-1.67	-1.68	-0.65	-
363	2	59	-0.54	-0.84	-1.61	-1.54	-0.52	138
Leo Express	3	59	-0.42	-0.73	-1.38	-1.37	-0.54	152
362	4	59	-0.45	-1.01	-1.57	-1.15	-0.60	94
163	5	59	-0.42	-1.06	-1.57	-1.15	-0.65	51
242 nákladní vlak	6	59	-0.40	-1.00	-1.41	-0.91	-0.41	33-36
Taurus 182	7	59	-0.40	-0.47	-1.34	-0.91	-0.49	140
471 City Elefant	8	59	-0.22	-1.17	-1.45	-1.25	-0.64	72
380	9	59	-0.43	-0.61	-1.66	-1.35	-0.67	161
680 Pendolino	10	59	-0.43	-0.70	-1.50	-1.44	-0.59	163
150	11	59	-0.50	-0.85	-1.86	-1.25	-0.67	83
380	12	59	-0.48	-0.72	-1.53	-1.06	-0.75	120
163 Regio Jet	13	59	-0.50	-0.57	-1.63	-0.97	-0.81	139
PKP EM57	14	59	-0.45	-0.78	-1.56	-1.08	-0.62	67
151	15	59	-0.48	-0.49	-1.60	-0.91	-0.77	120
Leo Express	16	59	-0.42	-0.63	-1.39	-0.97	-0.52	156
242 nákladní vlak	17	59	-0.46	-1.05	-1.41	-1.04	-0.52	33-41
362 R	18	59	-0.41	-0.78	-1.66	-0.82	-0.61	88
163 Os	19	59	-0.40	-1.06	-1.57	-1.15	-0.58	61
363 nákladní vlak	20	59	-0.38	-0.98	-1.32	-0.89	-0.46	38-40
Maximum		59	-0.22	-0.47	-1.32	-0.82	-0.41	
Minimum		59	-0.54	-1.32	-1.86	-1.68	-0.81	
Průměr		59	-0.43	-0.84	-1.53	-1.15	-0.60	

Tab. 9.1.3 Maximální hodnoty zatlačení pražce pod srdcovkou výhybky č. 59



Obr. 9.1.2 Porovnání zatlačení pražce pod srdcovkou výhybky

Souprava	Vlak č.	Výhybka	Max. hodnoty zatlačení pražce pod srdcovkou [mm]					Rychlost [km/h]
			S2	S3	S4	S5	S6	
151	1	63	-2.13	-3.06	-3.05	-1.93	-0.77	151
680 Pendolino	2	63	-2.12	-2.34	-2.69	-1.85	-0.68	160
181 nákladný vlak	3	63	-2.16	-2.79	-3.10	-2.21	-0.47	80
350	4	63	-2.08	-2.90	-2.95	-1.95	-0.71	150
363	5	63	-2.29	-2.74	-3.06	-1.91	-0.51	90
151	6	63	-2.14	-2.66	-3.13	-1.94	-0.89	152
Ř.V. 80 + 163	7	63	-2.30	-2.80	-3.03	-2.29	-0.60	80
Taurus 182	8	63	-2.02	-2.79	-3.09	-2.00	-0.75	145
363 nákladný vlak	9	63	-2.29	-3.16	-3.28	-2.17	-0.58	93
MVTV+prac. stroje	10	63	-2.03	-2.39	-2.52	-1.84	-0.55	68
150	11	63	-2.11	-3.09	-3.43	-2.15	-0.57	107
363	12	63	-2.14	-2.89	-3.33	-2.13	-0.95	128
151	13	63	-2.20	-2.96	-3.53	-2.21	-0.66	130
380	14	63	-2.22	-3.12	-3.58	-2.30	-0.86	141
350	15	63	-2.28	-3.04	-3.93	-2.17	-0.97	160
471	16	63	-2.22	-2.79	-3.17	-1.92	-0.55	122
362	17	63	-2.00	-2.59	-3.20	-1.97	-0.49	69
151	18	63	-2.30	-2.96	-3.64	-2.33	-0.88	156
Leo Express	19	63	-2.13	-2.73	-3.32	-2.02	-0.57	154
380	20	63	-2.25	-3.06	-4.17	-2.19	-0.81	153
163	21	63	-2.29	-3.02	-3.45	-2.06	-0.70	116
742	22	63	-1.83	-2.42	-2.61	-1.86	-0.43	43
150	23	63	-2.13	-3.03	-3.29	-1.65	-0.54	117
163 RegioJet	24	63	-2.16	-3.08	-3.49	-1.92	-0.69	133
380	25	63	-2.30	-3.04	-4.00	-2.18	-0.86	162
680 Pendolino	26	63	-2.29	-2.81	-3.85	-2.00	-0.73	161
Maximum		63	-1.83	-2.34	-2.52	-1.65	-0.43	
Minimum		63	-2.30	-3.16	-4.17	-2.33	-0.97	
Průměr		63	-2.17	-2.86	-3.30	-2.04	-0.68	

Tab. 9.1.4 Maximální hodnoty zatlačení pražce pod srdcovkou výhybky č. 63

Celkově větší zatlačení pražců prakticky u všech vlaků vykazuje výhybka č. 63. Velmi dobře je to vidět na "průhybových" křivkách na obrázcích č. 9.1.1 a 9.1.2. Pro každý snímač jsem u obou výhybek spočítala minimální, maximální a průměrnou hodnotu zatlačení. Maximální hodnota zatlačení je obvykle pod nápravou lokomotivy. Na obrázcích 9.1.1 a 9.1.2 jsou čárkovanými čarami vyneseny "průhybové" křivky pro výhybku č. 59 a plnými čarami pro výhybku č. 63.

Nejprve se zaměřím na hodnocení "průhybové" křivky podél srdcovky výhybky (obrázek 9.1.1). Na výhybce č. 59 dochází od snímače S0 přes snímač S1 až po snímač po snímač S4 prakticky k lineárnímu nárůstu zatlačení. K nárůstu překvapivě dochází i u snímače S7, kde je prakticky u všech vlaků zaznamenána maximální hodnota zatlačení. U výhybky č. 63 je průběh zatlačení trochu jiný. Od snímače S0 po snímač S1 je zatlačení

téměř ekvidistantní se zatlačeními na výhybce č. 59, poté ale dochází k strmějšímu nárůstu zatlačení od snímače S1 ke snímači S4 a od něj naopak jen k mírnému nárůstu po snímač S7. Maximálních hodnot u většiny vlaků je opět dosaženo u snímače S7. Tento fakt je poněkud překvapující a bylo by vhodné při dalších případných měřeních přidat ještě další snímač na dalším pražci. Pohyby pražců podél srdcovky výhybky jsou na výhybce č. 63 více než dvojnásobné.

Průhybová křivka pražce pod srdcovkou (obrázek 9.1.2) je na výhybce č. 59 podstatně plošší a s menšími zatlačeními, než je tomu u výhybky č. 63. Jinak je průběh křivek na výhybce č. 59 a 63 velmi podobný. Maximální hodnota zatlačení je vždy na snímači S4 u srdcovky výhybky. Zde se potvrdila hypotéza, že největší zatlačení je v místě nejvyšších dynamických účinků. Na výhybce č. 59 křivka od snímače S2 plynule klesá až do snímače S4 a odtud opět stoupá do snímače S6. Na výhybce č. 63 je průběh křivky stejný, nejmenší rozdíl v zatlačení pražců je na snímači S6 v odbočné větvi výhybek, což lze vysvětlit tím, že odbočná větev nebyla většinou vlaků vůbec pojížděna.

V příloze E jsou vykresleny "průhybové" křivky pro všechny vlaky a rovněž jsou tam ve větším formátu znovu uvedeny obrázky č. 9.1.1 a 9.1.2. Větší zatlačení pražců u výhybky č. 63 je možná způsobeno nepříliš dobře fungujícím odvodněním pod výhybkou. Ocelové tyče, které byly zatlačeny přes šterkové lože do pláně tělesa železničního spodku, byly při vytažení poměrně dost vlhké. Na výhybce č. 59 tato situace nenastala.

Zdvihy pražců, jsou zobrazeny v tabulkách č. 9.1.5 až 9.1.8. Je patrné, že zdvihy jsou v porovnání se zatlačeními pražců zanedbatelné. Některé maximální hodnoty zdvihů je třeba brát s rezervou, neboť se dle časového průběhu pohybů pražců (přílohy A, B, C, D) zjevně nejedná o reálný pohyb pražce. S přihlédnutím k této skutečnosti je největších zdvihů na obou výhybkách dosaženo na snímačích S5 a S6, které jsou v odbočné větvi výhybky, která nebyla většinou vlaků pojížděna. Větší zdvihy přece jen vykazuje výhybka č. 63 a to především na snímači S6, kde je rozdíl více než trojnásobný. Souvisí to s většími zatlačeními v hlavní větvi výhybky a s vysokou ohybovou tuhostí betonových pražců. Při zatlačení v hlavní větvi dochází k nadzvednutí nezatížené odbočné větve.

Souprava	Vlak č.	Výhybka	Max. hodnoty zdvihů pražců [mm]				Rychlost [km/h]
			S0	S1	S4	S7	
-	1	59	0.09	0.36	0.21	0.12	-
363	2	59	0.23	0.04	0.28	0.02	138
Leo Express	3	59	0.11	0.06	0.12	0.49	152
362	4	59	0.09	0.03	0.12	0.44	94
163	5	59	0.07	0.01	0.09	0.45	51
242 nákladní vlak	6	59	0.07	0.06	0.09	0.07	33-36
Taurus 182	7	59	0.31	0.05	0.41	0.62	140
471 City Elefant	8	59	0.11	0.02	0.05	0.52	72
380	9	59	0.24	0.07	0.21	0.24	161
680 Pendolino	10	59	0.17	0.14	0.13	0.53	163
150	11	59	0.05	0.01	0.08	0.08	83
380	12	59	0.08	0.36	0.18	0.03	120
163 Regio Jet	13	59	0.14	0.23	0.30	0.50	139
PKP EM57	14	59	0.08	0.02	0.07	0.36	67
151	15	59	0.10	0.42	0.20	0.06	120
Leo Express	16	59	0.14	0.14	0.14	0.52	156
242 nákladní vlak	17	59	0.09	0.02	0.06	0.36	33-41
362 R	18	59	0.04	0.14	0.14	0.22	88
163 Os	19	59	0.10	0.01	0.08	0.06	61
363 nákladní vlak	20	59	0.09	0.06	0.03	0.07	38-40
Maximum		59	0.31	0.42	0.41	0.62	
Minimum		59	0.04	0.01	0.03	0.02	
Průměr		59	0.12	0.11	0.15	0.29	

Tab. 9.1.5 Maximální hodnoty zdvihů pražců po délce srdcovky výhybky č. 59

Souprava	Vlak č.	Výhybka	Max. hodnoty zdvihů pražců [mm]				Rychlost [km/h]
			S0	S1	S4	S7	
151	1	63	0.08	0.06	0.22	0.46	151
680 Pendolino	2	63	0.42	0.68	0.87	0.80	160
181 nákladný vlak	3	63	0.14	0.05	0.08	0.14	80
350	4	63	0.20	0.11	0.62	0.43	150
363	5	63	0.07	0.07	0.05	0.09	90
151	6	63	0.12	0.11	0.30	0.18	152
Ř.V. 80 + 163	7	63	0.07	0.03	0.04	0.06	80
Taurus 182	8	63	0.04	0.23	0.30	0.27	145
363 nákladný vlak	9	63	0.13	0.05	0.08	0.17	93
MVTV+prac. stroje	10	63	0.07	0.09	0.01	0.08	68
150	11	63	0.17	0.24	0.41	0.26	107
363	12	63	0.18	0.34	0.42	0.54	128
151	13	63	0.03	0.12	0.15	0.04	130
380	14	63	0.10	0.21	0.14	0.27	141
350	15	63	0.05	0.11	0.05	0.12	160
471	16	63	0.03	0.06	0.04	0.04	122
362	17	63	0.02	0.02	0.02	0.06	69
151	18	63	0.11	0.35	0.16	0.25	156
Leo Express	19	63	0.04	0.10	0.04	0.09	154
380	20	63	0.07	0.21	0.08	0.31	153
163	21	63	0.02	0.22	0.04	0.02	116
742	22	63	0.03	0.03	0.00	0.04	43
150	23	63	0.03	0.12	0.05	0.06	117
163 RegioJet	24	63	0.06	0.15	0.12	0.13	133
380	25	63	0.07	0.15	0.12	0.24	162
680 Pendolino	26	63	0.43	0.51	0.45	0.81	161
Maximum		63	0.43	0.68	0.87	0.81	
Minimum		63	0.02	0.02	0.00	0.02	
Průměr		63	0.11	0.17	0.19	0.23	

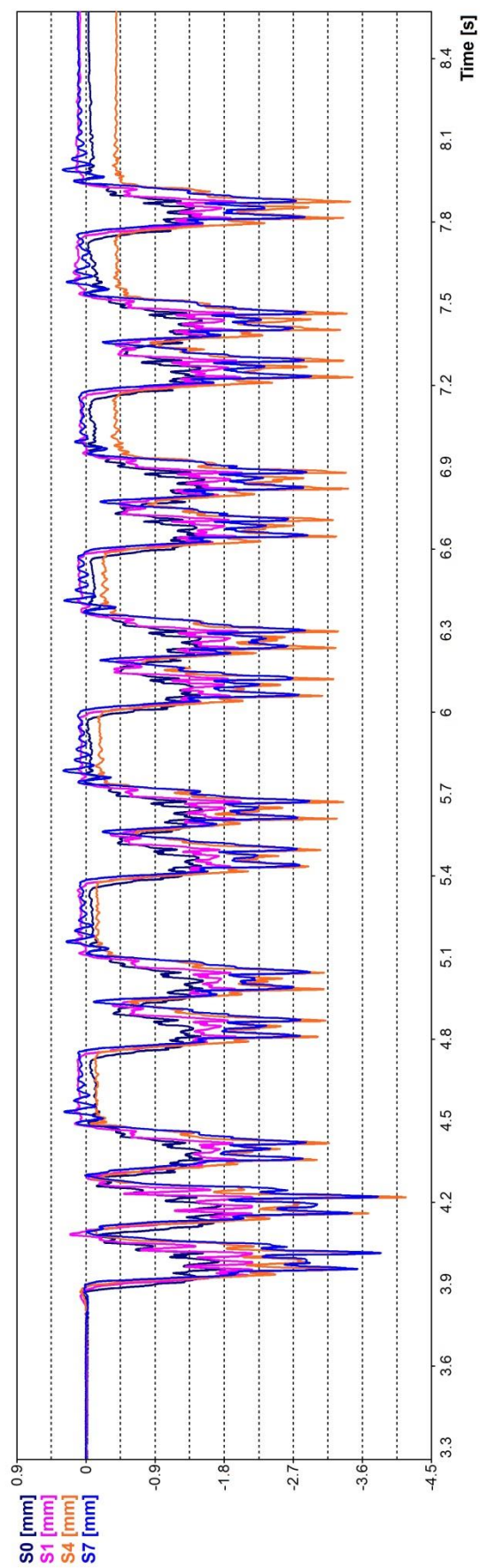
Tab. 9.1.6 Maximální hodnoty zdvihů pražců po délce srdcovky výhybky č. 63

Souprava	Vlak č.	Výhybka	Max. hodnoty zdvihů pražce pod srdcovkou [mm]					Rychlost [km/h]
			S2	S3	S4	S5	S6	
-	1	59	0.07	0.04	0.21	0.10	0.49	-
363	2	59	0.07	0.32	0.28	0.29	0.51	138
Leo Express	3	59	0.06	0.09	0.12	0.12	0.16	152
362	4	59	0.06	0.03	0.12	0.14	0.10	94
163	5	59	0.04	0.05	0.09	0.07	0.02	51
242 nákladní vlak	6	59	0.08	0.06	0.09	0.11	0.06	33-36
Taurus 182	7	59	0.15	0.91	0.41	0.55	0.31	140
471 City Elefant	8	59	0.16	0.02	0.05	0.05	0.11	72
380	9	59	0.10	0.44	0.21	0.65	0.41	161
680 Pendolino	10	59	0.08	0.12	0.13	0.20	0.08	163
150	11	59	0.05	0.11	0.08	0.01	0.01	83
380	12	59	0.12	0.31	0.18	0.29	0.11	120
163 Regio Jet	13	59	0.08	0.36	0.30	0.47	0.39	139
PKP EM57	14	59	0.04	0.18	0.07	0.02	0.03	67
151	15	59	0.08	0.46	0.20	0.59	0.15	120
Leo Express	16	59	0.05	0.11	0.14	0.34	0.10	156
242 nákladní vlak	17	59	0.05	0.06	0.06	0.02	0.04	33-41
362 R	18	59	0.09	0.09	0.14	0.30	0.06	88
163 Os	19	59	0.06	0.06	0.08	0.06	0.04	61
363 nákladní vlak	20	59	0.09	0.04	0.03	0.00	0.06	38-40
Maximum		59	0.16	0.91	0.41	0.65	0.51	
Minimum		59	0.04	0.02	0.03	0.00	0.01	
Průměr		59	0.08	0.19	0.15	0.22	0.16	

Tab. 9.1.7 Maximální hodnoty zdvihů pražce pod srdcovkou výhybky č. 59

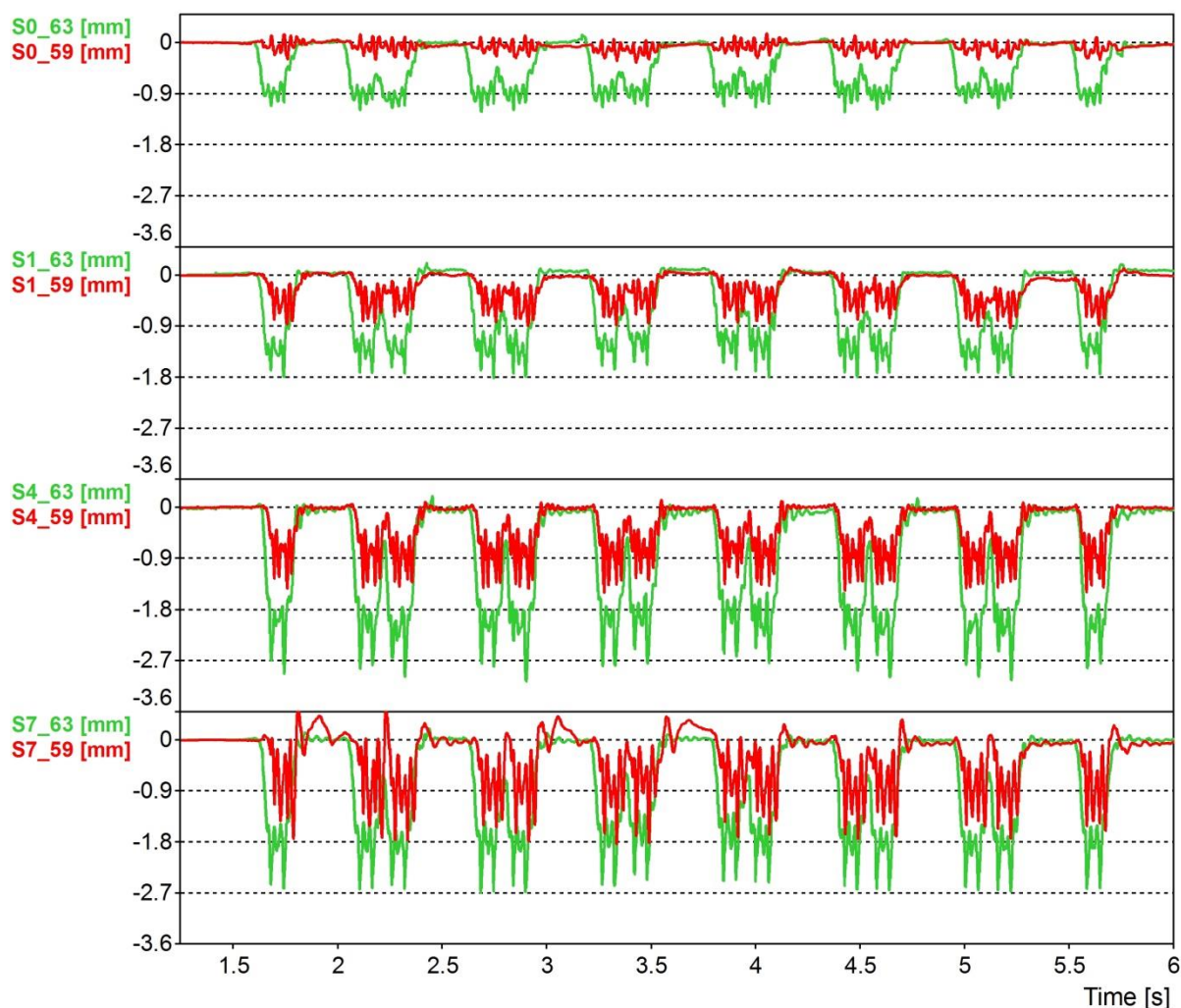
Souprava	Vlak č.	Výhybka	Max. hodnoty zdvihů pražce pod srdcovkou [mm]					Rychlost [km/h]
			S2	S3	S4	S5	S6	
151	1	63	0.06	0.06	0.22	0.49	1.26	151
680 Pendolino	2	63	0.10	0.49	0.87	0.25	0.50	160
181 nákladný vlak	3	63	0.06	0.03	0.08	0.01	0.38	80
350	4	63	0.22	0.02	0.62	1.43	0.87	150
363	5	63	0.03	0.05	0.05	0.07	0.55	90
151	6	63	0.17	0.19	0.30	0.41	0.99	152
Ř.V. 80 + 163	7	63	0.01	0.03	0.04	0.06	0.29	80
Taurus 182	8	63	0.18	0.22	0.30	0.15	0.42	145
363 nákladný vlak	9	63	0.07	0.07	0.08	0.05	0.33	93
MVTV+prac. stroje	10	63	0.07	0.09	0.01	0.05	0.21	68
150	11	63	0.19	0.22	0.41	0.22	0.54	107
363	12	63	0.34	0.15	0.42	0.33	0.70	128
151	13	63	0.07	0.04	0.15	0.04	0.54	130
380	14	63	0.30	0.03	0.14	0.12	0.55	141
350	15	63	0.17	0.04	0.05	0.18	0.96	160
471	16	63	0.02	0.06	0.04	0.11	0.16	122
362	17	63	0.03	0.04	0.02	0.02	0.01	69
151	18	63	0.26	0.10	0.16	0.42	0.70	156
Leo Express	19	63	0.06	0.01	0.04	0.07	0.24	154
380	20	63	0.24	0.09	0.08	0.24	0.59	153
163	21	63	0.05	0.01	0.04	0.01	0.64	116
742	22	63	0.01	0.02	0.00	0.03	0.02	43
150	23	63	0.09	0.02	0.05	0.04	0.60	117
163 RegioJet	24	63	0.18	0.05	0.12	0.31	0.47	133
380	25	63	0.31	0.04	0.12	0.28	0.70	162
680 Pendolino	26	63	0.09	0.44	0.45	0.13	0.53	161
Maximum		63	0.34	0.49	0.87	1.43	1.26	
Minimum		63	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	
Průměr		63	0.13	0.10	0.19	0.21	0.53	

Tab. 9.1.8 Maximální hodnoty zdvihů pražce pod srdcovkou výhybky č. 63

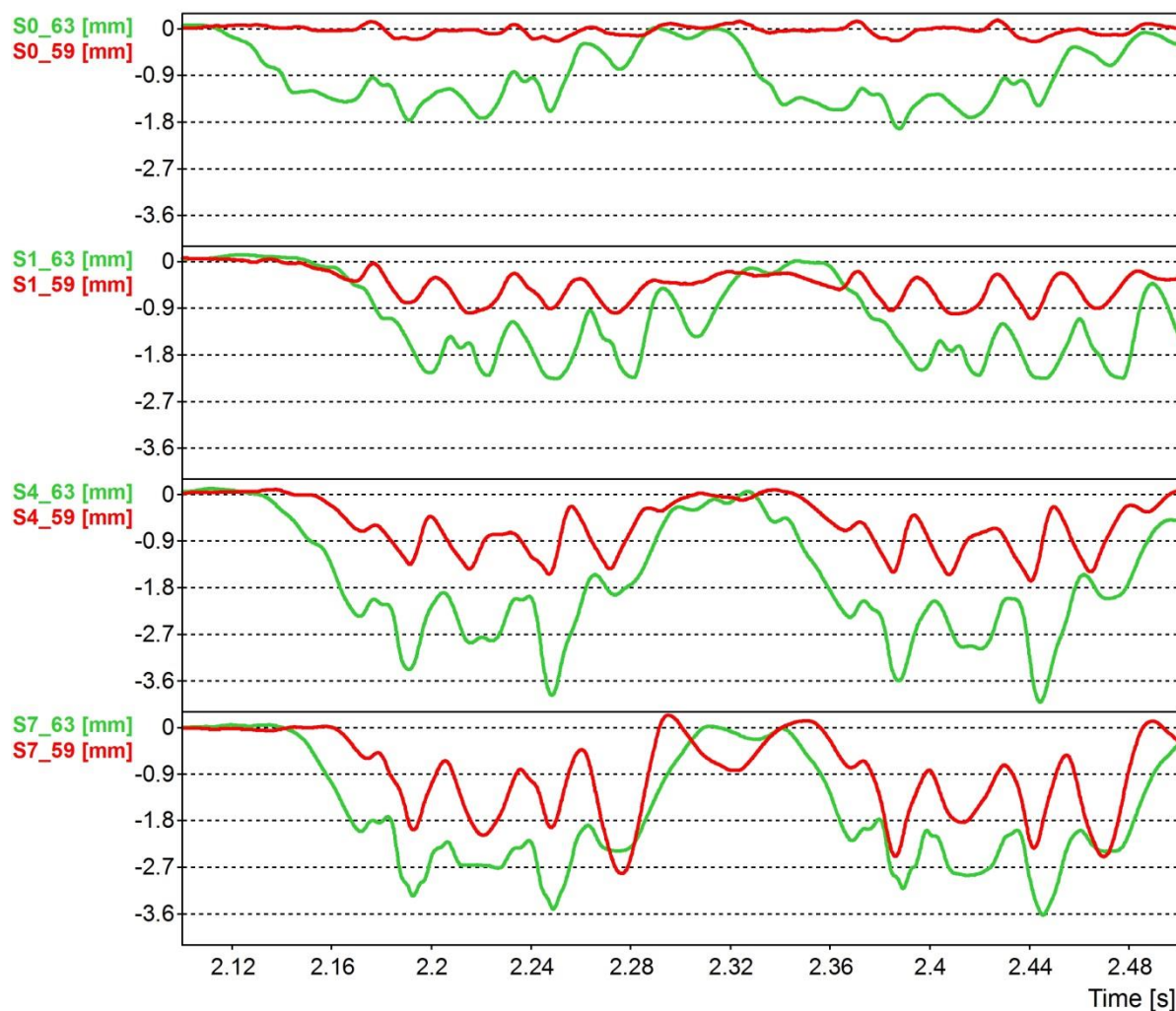


Obr. 9.1.3 Průběhy pohybů prážců po délce srdcovky na výhybce č. 63 při průjezdu rychlíku taženého lokomotivou řady 380

Pro srovnání časových průběhů pohybů pražců jsem vybrala jednotku řady 680 Pendolino (obrázek č. 9.1.4) a lokomotivu řady 380 (obrázek č. 9.15). Pendolino jsem vybrala proto, že se jedná o lehkou ucelenou jednotku, naopak lokomotiva řady 380 je reprezentantem těžkých lokomotiv, které vyvolávají největší zatlačení. Jak Pendolino, tak lokomotiva řady 380 je na obou konstrukcích stejnou rychlostí a jsou tedy zcela porovnatelné.



Obr. 9.1.4 Porovnání zatlačení pražců podél srdcovkou výhybky na jednotce řady 680 Pendolino



Obr. 9.1.5 Porovnání zatlačení pražců podél srdcovky výhybky na lokomotivě řady 380

Pokud se podíváme na obrázky č. 9.1.4 a 9.1.5, tak uvidíme, že potvrzují závěry z analýzy pomocí průhybových křivek. Extrémní zatlačení pražců odpovídají projetí jednotlivých kol nad pražcem, mezi nápravami dojde k vrácení pražce do původní polohy a poté k opětovnému stlačení další nápravou (kolem).

9.2 Vyhodnocení přenosu vibrací konstrukcí

9.2.1 Vyhodnocení zrychlení vibrací v časové rovině

V časové rovině se soustředím na vyhodnocení minim, maxim a efektivních hodnot zrychlení vibrací. Maxima a minima jsou myšlena jako nejvyšší kladné a záporné hodnoty zrychlení vibrací. Tyto hodnoty by mohly napomoci identifikovat například nekruhovitost

kola, vadnou či přetíženou nápravu nebo vady na pojížděné ploše kolejnice. Pro hodnocení RMS jsem zvolila dvojího přístupu – jako efektivní hodnotu (RMS) zrychlení vibrací a jako plochu pod křivkou klouzavé RMS. Tato hodnota dokáže navíc oproti běžné hodnotě RMS zohlednit například délku vlaku a počet náprav a také dává představu o celkovém energetickém působení vlaku na konstrukci. S měnění se RMS lze také sledovat zhoršování geometrie přechodu u srdcovky.

- **Hodnocení maximálních a minimálních hodnot zrychlení vibrací**

Z tab. 9.2.1, 9.2.2, 9.2.3 a 9.2.4 je evidentní, že maximální i minimální hodnoty zrychlení vibrací naměřené na výhybce č. 59, která je z hlediska opotřebení i geometrie přechodu v horším stavu, jsou v absolutní hodnotě vyšší jako u výhybky č. 63. Dále je možné pozorovat, jak jsou postupně vibrace tlumeny při přechodu z křídlové kolejnice (snímač A4Z) přes pražec (snímač A3Z) do šterkového lože (A0Z).

Souprava	Výhybka	Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]					Rychlost [km/h]
		A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	
363	59	-	-613	-1000	-204	-256	138
Leo Express	59	-	-710	-1390	-296	-382	152
362	59	-170	-295	-742	-80	-177	94
163	59	-61	-65	-409	-30	-118	51
242 nákladní vlak	59	-29	-74	-305	-27	-62	33-36
Taurus 182	59	-428	-923	-1548	-430	-403	140
471 City Elefant	59	-43	-75	-312	-30	-64	72
380	59	-525	-828	-1184	-323	-305	161
680 Pendolino	59	-465	-748	-1478	-468	-346	163
150	59	-73	-254	-684	-69	-104	83
380	59	-326	-306	-958	-76	-209	120
163 Regio Jet	59	-504	-717	-1262	-334	-336	139
PKP EM57	59	-176	-424	-784	-97	-156	67
151	59	-291	-475	-805	-145	-201	120
Leo Express	59	-301	-548	-901	-247	-206	156
242 nákladní vlak	59	-30	-140	-396	-60	-99	33-41
362 R	59	-104	-219	-804	-110	-175	88
163 Os	59	-62	-106	-458	-66	-113	61
363 nákladní vlak	59	-42	-155	-370	-83	-85	38-40

	ve svislém směru
	v podélném směru
	v příčném směru
	nezměřeno

Tab. 9.2.1 Minimální hodnoty zrychlení vibrací na výhybce č.59

Souprava	Výhybka	Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]					Rychlost [km/h]
		A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	
151	63	-248	-863	-1162	-113	-289	151
680 Pendolino	63	-92	-447	-819	-98	-221	160
181 nákladný vlak	63	-33	-252	-642	-85	-135	80
350	63	-208	-523	-676	-242	-250	150
363	63	-76	-453	-853	-91	-200	90
151	63	-137	-756	-1210	-268	-273	152
Ř.V. 80 + 163	63	-26	-167	-502	-30	-152	80
Taurus 182	63	-51	-447	-843	-115	-211	145
363 nákladný vlak	63	-66	-531	-978	-174	-247	93
MVTV+prac. stroje	63	-3	-100	-430	-58	-91	68
150	63	-123	-563	-985	-165	-232	107
363	63	-192	-630	-1036	-139	-233	128
151	63	-129	-486	-714	-88	-161	130
380	63	-116	-440	-807	-121	-190	141
350	63	-132	-674	-1302	-173	-293	160
471	63	-20	-284	-278	-53	-93	122
362	63	-15	-111	-222	-251	-109	69
151	63	-147	-599	-831	-107	-209	156
Leo Express	63	-18	-163	-554	-91	-147	154
380	63	-121	-426	-697	-129	-178	153
163	63	-124	-620	-1151	-165	-281	116
742	63	-2	-109	-334	-44	-87	43
150	63	-28	-364	-937	-113	-202	117
163 RegioJet	63	-70	-465	-677	-92	-219	133
380	63	-136	-432	-756	-123	-211	162
680 Pendolino	63	-43	-478	-961	-108	-314	161

	ve svislém směru
	v podélném směru
	v příčném směru

Tab. 9.2.2 Minimální hodnoty zrychlení vibrací na výhybce č. 63

Souprava	Výhybka	Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]					Rychlost [km/h]
		A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	
363	59	-	510	970	201	332	138
Leo Express	59	-	521	1125	323	387	152
362	59	97	237	717	108	146	94
163	59	37	66	313	41	91	51
242 nákladní vlak	59	16	33	206	31	53	33-36
Taurus 182	59	228	536	1104	502	684	140
471 City Elefant	59	32	82	193	36	79	72
380	59	218	476	891	202	335	161
680 Pendolino	59	219	483	997	577	419	163
150	59	62	123	432	92	105	83
380	59	140	377	847	86	246	120
163 Regio Jet	59	209	443	1019	255	327	139
PKP EM57	59	73	159	466	104	142	67
151	59	125	405	768	190	211	120
Leo Express	59	171	335	1008	218	235	156
242 nákladní vlak	59	14	96	347	67	84	33-41
362 R	59	61	239	605	85	191	88
163 Os	59	32	66	315	78	108	61
363 nákladní vlak	59	32	100	225	47	76	38-40

	ve svislém směru
	v podélném směru
	v příčném směru
	nezměřeno

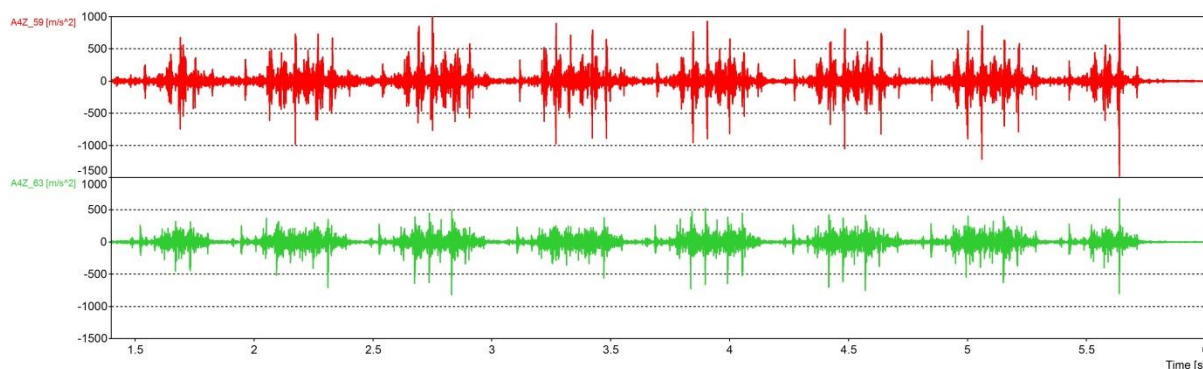
Tab. 9.2.3 Maximální hodnoty zrychlení vibrací na výhybce č. 59

Souprava	Výhybka	Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]					Rychlost [km/h]
		A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	
151	63	105	552	1282	204	341	151
680 Pendolino	63	57	361	671	102	414	160
181 nákladný vlak	63	29	161	392	88	102	80
350	63	107	545	646	123	323	150
363	63	53	275	679	106	170	90
151	63	80	460	1211	206	195	152
Ř.V. 80 + 163	63	28	125	350	40	95	80
Taurus 182	63	25	336	860	111	233	145
363 nákladný vlak	63	37	261	706	122	178	93
MVTV+prac. stroje	63	5	95	335	58	75	68
150	63	50	327	657	141	161	107
363	63	84	482	651	164	262	128
151	63	54	353	664	77	224	130
380	63	62	328	446	117	173	141
350	63	73	440	1239	218	254	160
471	63	19	174	196	42	107	122
362	63	9	76	147	19	82	69
151	63	61	376	782	105	206	156
Leo Express	63	13	183	395	81	121	154
380	63	59	309	477	111	259	153
163	63	72	416	1029	197	181	116
742	63	3	65	158	85	97	43
150	63	15	177	662	96	131	117
163 RegioJet	63	44	397	596	77	234	133
380	63	81	393	568	99	223	162
680 Pendolino	63	28	353	704	152	308	161

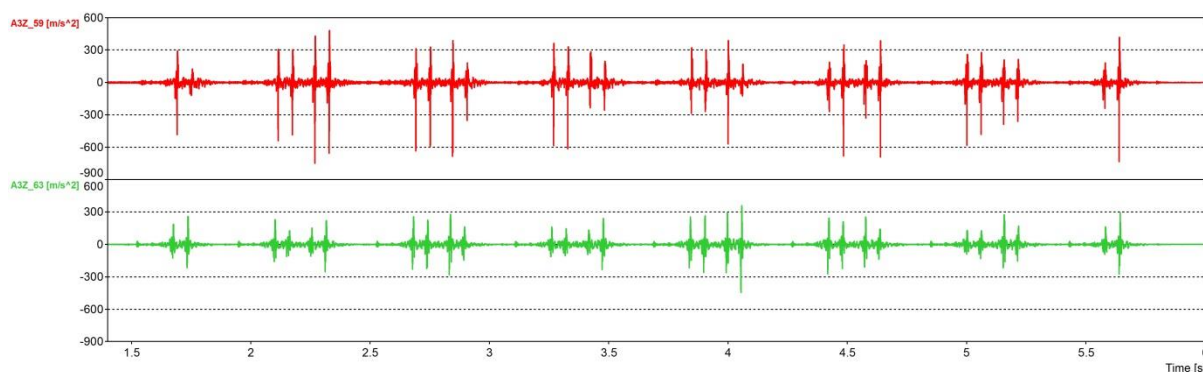
	ve svislém směru
	v podélném směru
	v příčném směru

Tab. 9.2.4 Minimální hodnoty zrychlení vibrací na výhybce č. 63

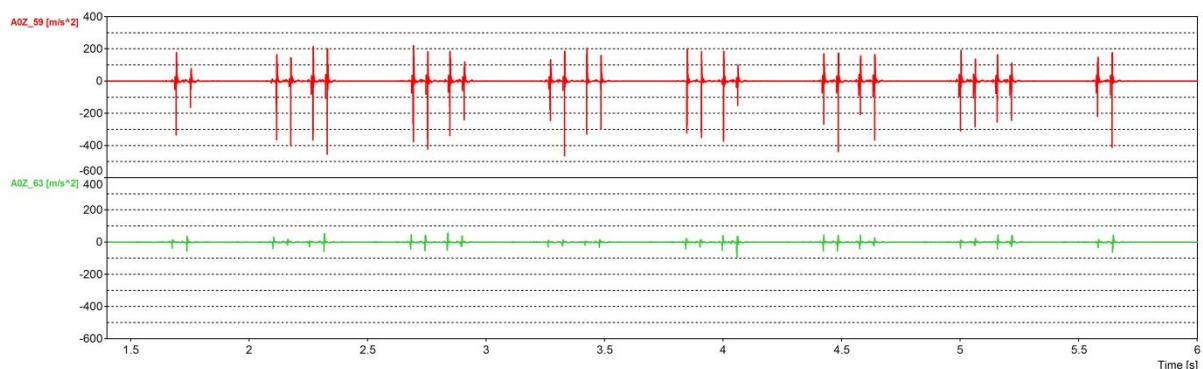
Vzhledem k tomu, že z pouhého hodnocení maximálních a minimálních hodnot zrychlení vibrací není možné získat představu o celkovém působení vlaku na konstrukci výhybky, je vhodné sledovat průběhy zrychlení vibrací v čase. Na obr. 9.2.1, 9.2.2 a 9.2.3 je příklad časového průběhu pro jednotku 680 Pendolino. Červenou barvou je znázorněn pro výhybku č. 59 a zelenou barvou pro výhybku č. 63. Na těchto grafech je vidět postupné utlumování vibrací konstrukcí (z kolejnice až do šterkového lože) a také porovnání průběhů na obou výhybkách.



Obr. 9.2.1 Časový průběh zrychlení vibrací na křídlové kolejnici (A4Z), Pendolino



Obr. 9.2.2 Časový průběh zrychlení vibrací na pražci (A3Z), Pendolino



Obr. 9.2.3 Časový průběh zrychlení vibrací ve šterkovém loži (A0Z), Pendolino

Další grafy časového průběhu zrychlení vibrací jsou pak součástí Přílohy E (výhybka č. 59) a Přílohy F (výhybka č. 63). Po jejich přezkoumání lze konstatovat, že vibrace na výhybce č. 63 nabývají obecně nižších hodnot a ve šterkovém loži jsou mnohem výrazněji tlumeny než u výhybky č. 59.

- **Hodnocení efektivních hodnot zrychlení vibrací**

Souprava	Výhybka	Efektivní hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]					Rychlost [km/h]
		A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	
363	59	-	34	86	15	26	138
Leo Express	59	-	36	93	19	29	152
362	59	6	25	65	14	21	94
163	59	2	8	21	3	6	51
242 nákladní vlak	59	2	5	16	3	5	33-36
Taurus 182	59	17	46	89	19	27	140
471 City Elefant	59	3	10	20	3	6	72
380	59	20	41	100	23	32	161
680 Pendolino	59	20	43	108	25	32	163
150	59	4	17	53	10	15	83
380	59	10	31	67	11	18	120
163 Regio Jet	59	14	35	81	15	24	139
PKP EM57	59	4	14	34	6	10	67
151	59	11	36	69	12	20	120
Leo Express	59	10	26	95	17	26	156
242 nákladní vlak	59	1	7	20	3	6	33-41
362 R	59	4	20	59	12	19	88
163 Os	59	2	8	25	4	8	61
363 nákladní vlak	59	3	7	26	4	8	38-40

	ve svislém směru
	v podélném směru
	v příčném směru
	nezměřeno

Tab. 9.2.5 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací na výhybce č. 59

Souprava	Výhybka	Efektivní hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]					Rychlost [km/h]
		A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	
151	63	5	35	71	12	22	151
680 Pendolino	63	4	29	70	12	24	160
181 nákladný vlak	63	1	22	52	10	17	80
350	63	6	38	66	13	23	150
363	63	2	21	43	8	14	90
151	63	4	32	65	13	22	152
Ř.V. 80 + 163	63	1	16	27	4	9	80
Taurus 182	63	2	29	61	11	20	145
363 nákladný vlak	63	2	27	52	10	17	93
MVTV+prac. stroje	63	1	11	28	5	9	68
150	63	3	28	57	12	18	107
363	63	6	49	82	16	28	128
151	63	3	32	59	10	18	130
380	63	3	29	62	13	22	141
350	63	3	34	74	14	26	160
471	63	1	23	31	5	11	122
362	63	1	13	18	10	11	69
151	63	4	35	68	13	26	156
Leo Express	63	1	21	64	12	20	154
380	63	3	32	69	14	25	153
163	63	3	37	77	15	24	116
742	63	1	7	14	3	6	43
150	63	1	23	61	13	20	117
163 RegioJet	63	3	34	57	10	19	133
380	63	4	31	75	15	27	162
680 Pendolino	63	2	31	77	14	27	161

	ve svislém směru
	v podélném směru
	v příčném směru

Tab. 9.2.6 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací na výhybce č. 63

Pro podrobnější analýzu byly zvoleny čtyři reprezentativní soupravy, které projížděly oběma výhybkami téměř stejnou rychlostí a na kterých budou demonstrovány jednotlivé děje. Jedná se o soupravy: 680 Pendolino, Leo Express, lokomotiva řady 380 + 4 vozy, Regio Jet.

Pro soupravu **680 Pendolino** je hodnota RMS na výhybce č. 59 ve štěrkovém loži o 80% vyšší než na výhybce č. 63, na pražci je o 30% vyšší a na křídlové kolejnici je rozdíl těchto hodnot 40%. V podélném směru je hodnota RMS naměřená na křídlové kolejnici výhybky č. 59 o 50% vyšší a v příčném směru o 25% vyšší jako na výhybce č. 63.

Pro soupravu **Leo Express** je hodnota RMS na výhybce č. 59 ve štěrkovém loži o 90% vyšší než na výhybce č. 63, na pražci je o 20% vyšší a na křídlové kolejnici je rozdíl těchto hodnot 30%. V podélném směru je hodnota RMS naměřená na křídlové kolejnici výhybky č. 59 o 30% vyšší a v příčném směru o 25% vyšší jako na výhybce č. 63.

Pro soupravu **lokomotiva řady 380 + vagony** je hodnota RMS na výhybce č. 59 ve štěrkovém loži o 80% vyšší než na výhybce č. 63, na pražci je o 20% vyšší a na křídlové kolejnici je rozdíl těchto hodnot 30%. V podélném směru je hodnota RMS naměřená na křídlové kolejnici výhybky č. 59 o 40% vyšší a v příčném směru o 20% vyšší jako na výhybce č. 63.

Pro soupravu **Regio Jet** je hodnota RMS na výhybce č. 59 ve štěrkovém loži o 80% vyšší než na výhybce č. 63, na pražci jsou téměř stejné hodnoty u obou výhybek a na křídlové kolejnici je rozdíl těchto hodnot 30%. V podélném směru je hodnota RMS naměřená na křídlové kolejnici výhybky č. 59 o 35% vyšší a v příčném směru o 20% vyšší jako na výhybce č. 63.

Souprava	Výhybka	Efektivní hodnoty zrychlení vibrací [m.s^{-2}]					Rychlost [km/h]
		A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	
Pendolino	59	39	111	381	90	125	163
	63	10	85	270	53	93	160
Leo Express	59	11	40	180	37	57	156
	63	2	35	136	28	46	154
Loko 380 + 4	59	28	79	250	61	87	161
	63	6	64	198	41	72	162
Regio Jet	59	25	83	259	51	82	139
	63	6	84	201	39	71	133

	ve svislém směru
	v podélném směru
	v příčném směru

Tab. 9.2.7 Porovnání efektivních hodnot zrychlení vibrací na obou výhybkách pro zvolené soupravy

- Hodnocení plochy pod křivkou klouzavé RMS**

V tab. 9.2.8 jsou porovnány vybrané reprezentativní soupravy z hlediska velikosti plochy pod křivkou klouzavé RMS.

Porovnání výhybky č. 59 a výhybky č. 63

Pro soupravu **680 Pendolino** je tato hodnota na výhybce č. 59 ve šterkovém loži o 75% vyšší než na výhybce č. 63, na pražci je o 25% vyšší a na křídlové kolejnici je rozdíl těchto hodnot 30%. V podélném směru je hodnota RMS naměřená na křídlové kolejnici výhybky č. 59 o 54% vyšší a v příčném směru o 25% vyšší jako na výhybce č. 63.

Pro soupravu **Leo Express** je hodnota RMS na výhybce č. 59 ve šterkovém loži o 80% vyšší než na výhybce č. 63, na pražci je o 10% vyšší a na křídlové kolejnici je rozdíl těchto hodnot 25%. V podélném směru je hodnota RMS naměřená na křídlové kolejnici výhybky č. 59 o 25% vyšší a v příčném směru o 20% vyšší jako na výhybce č. 63.

Pro soupravu **lokomotiva řady 380 + vagony** je hodnota RMS na výhybce č. 59 ve šterkovém loži o 80% vyšší než na výhybce č. 63, na pražci je o 20% vyšší a na křídlové kolejnici je rozdíl těchto hodnot 20%. V podélném směru je hodnota RMS naměřená na křídlové kolejnici výhybky č. 59 o 30% vyšší a v příčném směru o 20% vyšší jako na výhybce č. 63.

Pro soupravu **Regio Jet** je hodnota RMS na výhybce č. 59 ve šterkovém loži o 75% vyšší než na výhybce č. 63, na pražci jsou téměř stejné hodnoty u obou výhybek a na křídlové kolejnici je rozdíl těchto hodnot 20%. V podélném směru je hodnota RMS naměřená na křídlové kolejnici výhybky č. 59 o 25% vyšší a v příčném směru o 15% vyšší jako na výhybce č. 63.

Z naměřených hodnot lze usoudit, že obecně u konkrétní soupravy jsou na všech snímačích hodnoty RMS na výhybce č. 59 vyšší, přičemž největšího rozdílu je dosaženo na snímači A0Z (šterkové lože), menšího rozdílu pak na snímači A4Z (na kolejnici ve svislém směru) a nejmenší rozdíly vykazuje snímač A3Z (na pražci).

Na křídlové kolejnici je největší rozdíl efektivních hodnot zrychlení vibrací v podélném směru (snímač A5X), menší pak ve svislém směru (snímač A4Z) a nejmenší rozdíl na těchto výhybkách lze sledovat v příčném směru (snímač A6Y).

Všechny tyto závěry se shodují i s hodnocením plochy pod křivkou klouzavé RMS. Grafy klouzavé RMS na jednotce Pendolino a na lokomotivě řady 380 jsou k nahlédnutí v Příloze J.

Souprava	Výhybka	Hodnoty plochy pod křivkou klouzavé RMS [m.s^{-1}]					Rychlost [km/h]
		A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	
Pendolino	59	39	111	381	90	125	163
	63	10	85	270	53	93	160
Leo Express	59	11	40	180	37	57	156
	63	2	35	136	28	46	154
Loko 380 + 4	59	28	79	250	61	87	161
	63	6	64	198	41	72	162
Regio Jet	59	25	83	259	51	82	139
	63	6	84	201	39	71	133

	ve svislém směru
	v podélném směru
	v příčném směru

Tab. 9.2.8 Porovnání velikosti plochy pod křivkou klouzavé RMS na obou výhybkách pro zvolené soupravy

Procentuální zhodnocení přenosu vibrací konstrukcí

Při přejezdu jednotky **680 Pendolino** výhybkou č. 59 se na pražec přenese 30% vibrační energie z kolejnice a do šterkového lože 10% této energie. Zároveň se na křídlové

kolejnici přenesse z vibrační energie ve svislém směru do směru podélného 25% a do směru příčného 30%.

Při přejezdu jednotky **680 Pendolino výhybkou č. 63** se na pražec přenesse 30% vibrační energie z kolejnice a do šterkového lože 4% této energie. Zároveň se na křídlové kolejnici přenesse z vibrační energie ve svislém směru do směru podélného 35% a do směru příčného 20%.

Při přejezdu jednotky **Leo Express výhybkou č. 59** se na pražec přenesse 20% vibrační energie z kolejnice a do šterkového lože 6% této energie. Zároveň se na křídlové kolejnici přenesse z vibrační energie ve svislém směru do směru podélného 20% a do směru příčného 30%.

Při přejezdu jednotky **Leo Express výhybkou č. 63** se na pražec přenesse 25% vibrační energie z kolejnice a do šterkového lože 1% této energie. Zároveň se na křídlové kolejnici přenesse z vibrační energie ve svislém směru do směru podélného 20% a do směru příčného 35%.

Při přejezdu soupravy **loko 380 + 4 vozy výhybkou č. 59** se na pražec přenesse 30% vibrační energie z kolejnice a do šterkového lože 10% této energie. Zároveň se na křídlové kolejnici přenesse z vibrační energie ve svislém směru do směru podélného 25% a do směru příčného 35%.

Při přejezdu jednotky **loko 380 + 4 vozy výhybkou č. 63** se na pražec přenesse 30% vibrační energie z kolejnice a do šterkového lože 3% této energie. Zároveň se na křídlové kolejnici přenesse z vibrační energie ve svislém směru do směru podélného 20% a do směru příčného 35%.

Při přejezdu soupravy **Regio Jet výhybkou č. 59** se na pražec přenesse 30% vibrační energie z kolejnice a do šterkového lože 10% této energie. Zároveň se na křídlové kolejnici přenesse z vibrační energie ve svislém směru do směru podélného 20% a do směru příčného 30%.

Při přejezdu soupravy **Regio Jet výhybkou č. 63** se na pražec přenesse 40% vibrační energie z kolejnice a do šterkového lože 3% této energie. Zároveň se na křídlové kolejnici přenesse z vibrační energie ve svislém směru do směru podélného 20% a do směru příčného 35%.

Z naměřených hodnot je zřejmé, že výraznějšího rozdílu v přenosu vibrací u těchto dvou výhybek je možné vidět pouze na snímači ve šterkovém loži (A0Z), do kterého se u výhybky č. 59 procentuálně přenesou větší část vibrační energie z křídlové kolejničky jako u výhybky č. 63. Přenos vibrací do pražce a podélného a svislého směru na křídlové kolejnici se liší u obou na těchto výhybkách o nepatrné hodnoty.

9.2.2 Vyhodnocení zrychlení vibrací ve frekvenční rovině

Převod signálu z časové do frekvenční oblasti byl proveden pomocí rychlé Fourierovy transformace. Takto vytvořené frekvenční spektra jsou spolu s časovými průběhy zrychlení vibrací součástí Přílohy F pro výhybku č. 59 a Přílohy G pro výhybku č. 63.

Vzhledem ke složitosti signálu jsem se rozhodla pro ukázkou vyhodnocení přechodu vibrací konstrukcí ve frekvenční oblasti použít Welchovu metodu. Její zkrácení oproti rychlé Fourierově transformaci je minimální a vhodným průměrováním u této metody je možné docílit přehlednosti pro porovnání několika signálů v jednom grafu. Takto vytvořené grafy frekvenčního spektra jsou pro výhybku č. 59 v Příloze H a pro výhybku č. 63 v Příloze I.

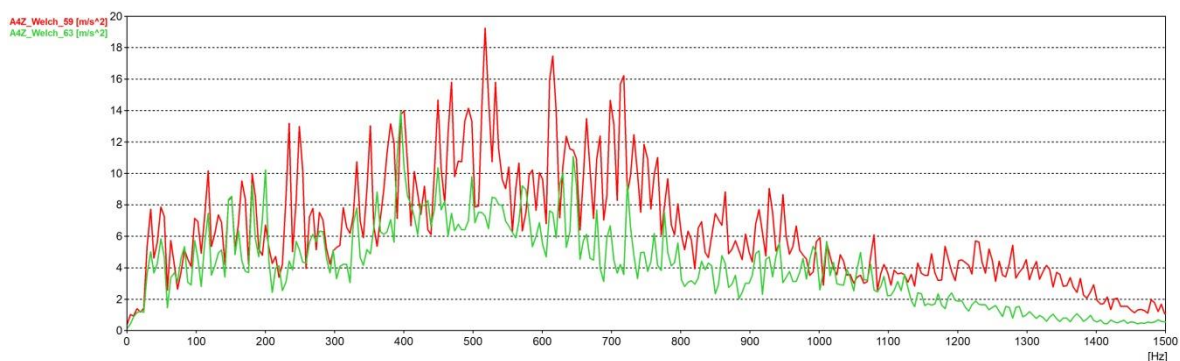
Při globálním hodnocení je možné všimnout si hned několik výrazných zákonitostí. Porovnáním výhybek mezi sebou při přejezdu stejných souprav téměř stejnými nebo úplně stejnými rychlostmi lze odpozorovat, že na výhybce č. 59 jsou hodnoty zrychlení vibrací obecně vyšší (obr. 9.2.2.1, obr. 9.2.2.2), což odpovídá i časovým průběhům vibrací a souhlasí s předpokladem, že srdcovka s větším ojetím a kontaktně únavovou vadou bude vykazovat vyšší hodnoty zrychlení vibrací. Také je na všech takovýmto způsobem porovnaných soupravách patrný posun klíčových frekvencí (odpovídajících nejvyšším hodnotám zrychlení vibrací) na výhybce č. 59 směrem k vyšším hodnotám.

Další pravidelně se vyskytující a zobecnění schopnou záležitostí je fakt, že na křídlové kolejnici jsou nejdůležitější frekvenční složky v oblasti vyšších frekvencí jako na pražci a ve šterkovém loži jsou hodnoty zrychlení vibrací tak nízké, že u naprosté většiny souprav nemá smysl uvažovat o klíčových frekvencích, neboť v celém frekvenčním pásmu je průběh zrychlení vibrací téměř konstantní.

Zároveň na všech změřených soupravách je vidět dva výrazné frekvenční vrcholy v oblasti kolem 50 Hz, které mohou odpovídat působení jednotlivých kol a náprav. Dále je

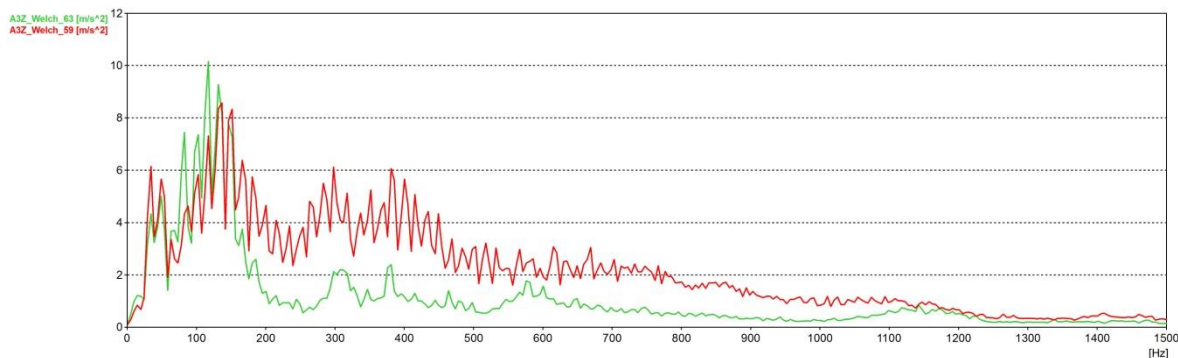
také na většině měřených souprav možné pozorovat, že jednotlivé vrcholy se objevují na všech třech snímačích (tedy na kolejnici, pražci i ve šterku) při téměř stejných frekvencích.

V neposlední řadě stojí za povšimnutí také to, že na výhybce č. 63 se objevuje vždy v oblasti 100 Hz na snímači A3Z umístěném na pražci výrazný vrchol převyšující (u některých souprav i několikanásobně) hodnoty na křídlové kolejnici v této frekvenční oblasti. Na některých vlacích je tento vrchol dokonce vyšší než jakýkoliv vrchol na křídlové kolejnici v celém frekvenčním spektru. Na výhybce č. 59 je tento jev také možno pozorovat, avšak je tady několik výjimek. Tvoří je lehké ucelené soupravy (Pendolino, Leo Express) a nákladní vlaky pohybující s nízkou rychlostí (30-40 km/h). Je to logické, vzhledem k tomu, že nižší hmotnost nebo nižší rychlost vyvolává menší dynamické účinky.



Obr. 9.2.2.1 Welchova metoda pro porovnání výhybek - křídlová kolejnice – Pendolino

(výhybka č. 59 – červená, výhybka č. 63 – zelená)



Obr. 9.2.2.1 Welchova metoda pro porovnání výhybek - pražec – Pendolino

(výhybka č. 59 – červená, výhybka č. 63 – zelená)

Pro hlubší analýzu se vyhodnocení opět zaměří na reprezentativní soupravy. Pro účely této kapitoly byly zvoleny Leo Express (jako lehká ucelená souprava) a Regio Jet (jako souprava s těžkou lokomotivou).

Jednotka Leo Express má na křídlové kolejnici na výhybce č. 59 nejvýraznější vrcholy v oblastech 350 až 450 Hz a pak kolem 600 a 700 Hz. Na výhybce č. 63 jsou nejvyšší hodnoty zrychlení vibrací pro tuto soupravu v oblastech 300 až 370 Hz a okolo 500 Hz. Na pražci jsou na výhybce č. 59 zřejmé klíčové frekvence v oblasti 350 až 450 Hz, zatím co u výhybky č. 63 se jedná o oblast 300 až 400 Hz.

U soupravy Regio Jet pozorujeme na křídlové kolejnici klíčové frekvence na výhybce č. 59 v oblasti 500 až 800 Hz, zatím co na výhybce č. 63 se jedná o rozmezí 450 až 650 Hz. Na pražci jsou na výhybce č. 59 nejvýraznější vrcholy v oblasti 50 až 150 Hz a na výhybce č. 63 téměř přesně na hodnotě 100 Hz.

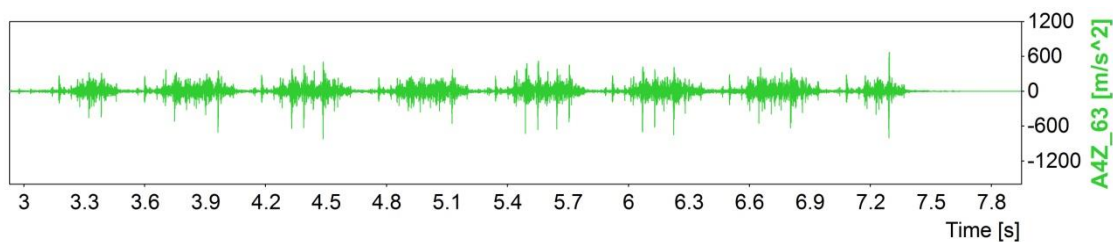
Porovnání výhybek prostřednictvím dynamického působení těchto dvou souprav dokazuje, že dynamické účinky jakékoliv soupravy na výhybku č. 59 jsou větší jako na výhybku č. 63 (vyšší hodnoty zrychlení vibrací na výhybce č. 59 a zároveň vyšší hodnoty klíčových frekvencí). Také se ukázalo, že hodnoty zrychlení vibrací na pražci v oblasti frekvencí okolo 100 Hz jsou závislé na hmotnosti na nápravu a na rychlosti.

9.2.3 Vyhodnocení zrychlení vibrací v časově – frekvenční rovině

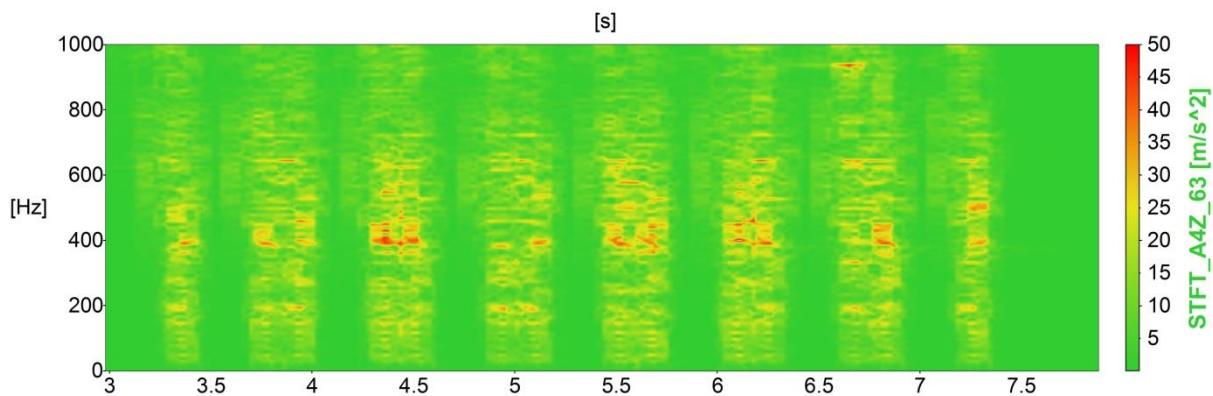
Pro vyhodnocení zrychlení vibrací v časově-frekvenční rovině bylo využito krátkodobé Fourierovy transformace (STFT), jejímž výsledkem je hustotní spektrogram. Vodorovná osa je časová, svislá je frekvenční a hodnoty zrychlení vibrací jsou znázorněny pomocí barev – od nejnižších hodnot (zelená barva) po nejvyšší (červená barva). Hustotní spektrogram je pro vyhodnocení signálu tohoto typu výhodný z toho důvodu, že z něj jde přímo poznat, které frekvenční složky odpovídají daným hodnotám zrychlení vibrací a zároveň i to, ve kterém časovém okamžiku se vyskytují.

Vytvořené hustotní spektrogramy lze vidět v Příloze K, pro ukázkou jsou na obrázcích níže (obr. 9.2.3.1, obr. 9.2.3.2, obr. 9.2.3.3, obr. 9.2.3.4) ukázány pro jednotku 680 Pendolino spolu s časovým průběhem zrychlení vibrací. To nám umožňuje povšimnout si, jak se extrémní hodnoty zrychlení vibrací znázorňují v spektrogramu v podobě červených ploch odpovídajících daným časovým intervalům, které odpovídají působení jednotlivých kol a náprav. V porovnání s Welchovou metodou (obr. 9.2.2.1) je

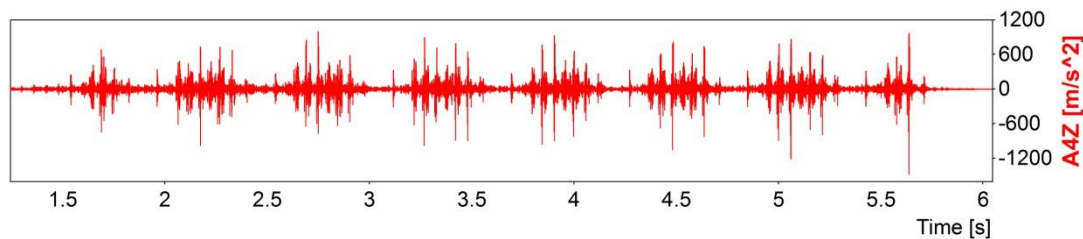
vidět, že dané (v STFT červenou barvou znázorněné) extrémy se i podle Welchovy metody (kde jsou znázorněny jako jednotlivé vrcholy) vyskytují při stejných frekvencích.



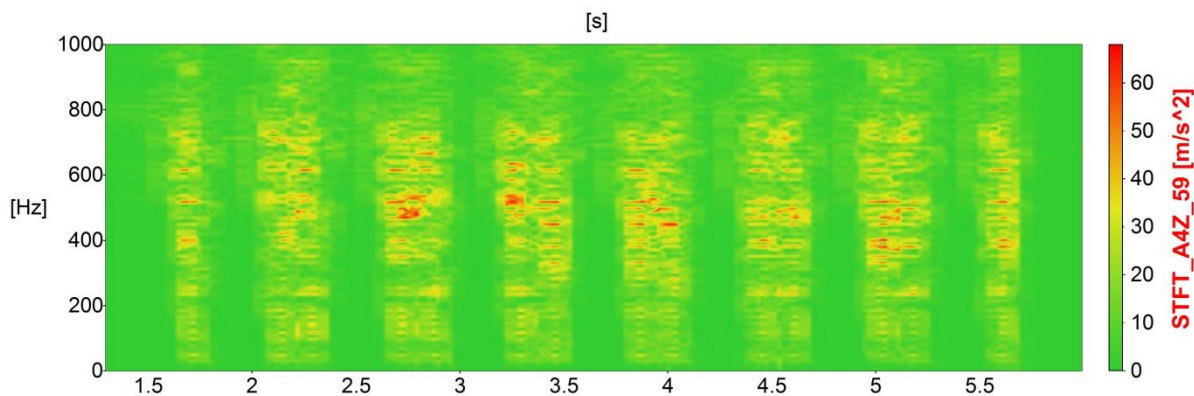
Obr. 9.2.3.1 Časový průběh zrychlení vibrací – výhybka č. 63 - Pendolino



Obr. 9.2.3.2 Hustotní spektrogram zrychlení vibrací – výhybka č. 63 - Pendolino



Obr. 9.2.3.3 Časový průběh zrychlení vibrací – výhybka č. 59 - Pendolino



Obr. 9.2.3.4 Hustotní spektrogram zrychlení vibrací – výhybka č. 59 – Pendolino

V příloze K jsou kromě těchto grafů také hustotní spektrogramy pro jednotku Leo Express, a to na obou výhybkách na křídlové kolejnici i na pražci.

U křídlové kolejnice je patrné, že absolutní hodnoty zrychlení vibrací jsou pro výhybku č. 59 vyšší a zároveň je možné srovnat klíčové frekvence na obou výhybkách. Na výhybce č. 59 se pohybují v oblasti 350 až 450 Hz a 550 až 700 Hz, zatím co na výhybce č. 63 jsou nejvýraznější hodnoty zrychlení vibrací v oblasti 300 až 400 Hz a 500 až 600 Hz. Toto zjištění přesně odpovídá hodnocení pomocí Welchovy metody a podporuje teorii, že na výhybce č. 59 jsou klíčové složky posunuty směrem k vyšším frekvencím.

Na hustotních spektrogramech reprezentujícím pražec jsou na první pohled výrazné rozdíly mezi výhybkami. Na výhybce č. 59 jsou kromě jedné nápravy podobné hodnoty zrychlení v celém frekvenčním pásmu od 50 do přibližně 500 Hz. U výhybky č. 63 jsou v oblasti kolem 100 Hz hodnoty výrazně vyšší než v celém dalším frekvenčním rozsahu. Zároveň jsou tyto hodnoty nejen vyšší než hodnoty ve stejné frekvenci na výhybce č. 59, ale také překračují hodnoty zrychlení vibrací na kolejnici (v dané oblasti okolo 100 Hz).

Z časově-frekvenční analýzy plyne, že tato metoda podporuje jak hodnocení v časové, tak i ve frekvenční rovině a dokazuje jejich správnost.

10. Závěr

Z hlediska pohybového chování konstrukcí je zcela zřejmé, že mnohem větší zatlačení pražců vykazuje výhybka č. 63. Lehčí ucelené jednotky jako je jednotka řady 680 Pendolino, nebo vlaky Leo Express vykazují při stejné rychlosti jako vlaky s lokomotivami menší zatlačení pražců. Extrémní hodnoty zatlačení se vyskytují právě pod těžkými lokomotivami, jako jsou lokomotivy řady 380, 350 a 163 apod. Ukazuje se, že zatlačení pražců je rovněž závislé na rychlosti vlakových souprav, protože těžké nákladní vlaky vykazují často malé hodnoty zatlačení pražců v porovnání s rychlejšími soupravami. Největších zatlačení je na obou výhybkách dosaženo v místě snímače S7, tento je by bylo vhodné dále zkoumat. Nabízí se hypotéza, že většina vlaků jezdí přes měřené výhybky plnou traťovou rychlostí a proto se větší část dynamického rázu posouvá i mimo teoretický bod přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky a to ve směru jízdy vlaku. Na výhybce č. 59 dochází po délce pražce téměř k lineárnímu nárůstu zatlačení od snímače S0 až po snímač S7. Na výhybce č. 63 rovněž dochází k nárůstu zatlačení od snímače S0 po snímač S7, ale rozdíly mezi snímačem S4 a S7 jsou již poměrně malé. Průhybová křivka pražce pod srdcovkou výhybky je u obou konstrukcí velmi podobná. Na výhybce č. 59 je

však podstatně plošší. Největší zatlačení jsou dle očekávání na nejvíce dynamicky zatěžovaném místě přímo pod hrotem srdcovky na snímači S4. Nejmenší rozdíl mezi oběma konstrukcemi je pak v místě snímače S7 na hlavě pražce v odbočné větvi výhybky, což je způsobeno tím, že tato větev nebyla většinou vlaků vůbec pojížděna. Větší zdvihy pražců jsou na výhybce č. 63, především v místě snímačů S5 a S6 v odbočné větvi výhybky. Tento fakt zřejmě souvisí s vysokou ohybovou tuhostí betonových pražců, kdy při zatlačení pražce v hlavní větvi je odbočná větev nadzdvihována.

Vibrace na výhybce č. 59 nabývají vyšších hodnot a jejich větší část se přenáší až do šterkového lože. Na výhybce č. 63 nabývají klíčové frekvenční složky nižších hodnot a jsou posunuty směrem k nižším frekvencím. Tohoto jevu lze využít v budoucnu pro diagnostiku srdcovek, jelikož byl sledován u všech souprav. Při pravidelném měření by bylo možné pozorovat, jak se se zvětšujícím se opotřebením postupně zvyšují hodnoty frekvencí odpovídající klíčovým složkám zrychlení vibrací, a tak včas odhalit rozvíjející se vadu na srdcovce. Větší hodnoty RMS jsou u všech souprav na výhybce č. 59, největší rozdíl byl ve šterkovém loži na snímači A0Z, poté na kolejnici (snímač A4Z) a na pražci (snímač A3Z) byl rozdíl nejmenší. Větší přenos vibrací do šterkového lože u výhybky č. 59 může souviset s celkově větší tuhostí podepření. Největšího rozdílu v efektivní hodnotě zrychlení vibrací na křídlové kolejnici bylo dosaženo v podélném směru (snímač A5X) a nejmenšího v příčném směru (snímač A6Y). Tento fakt může souviset s celkově horší geometrií přechodu na výhybce č. 59, kde jsou hodnoty vyšší. Na kolejnici jsou klíčové frekvenční složky v oblasti vyšších frekvencí než na pražci a ve šterkovém loži nejsou téměř žádné výrazné frekvenční vrcholy. Na všech naměřených vlcích se objevují frekvenční vrcholy v oblasti 50 Hz, což je pravděpodobně souvisí s působením jednotlivých náprav. V neposlední řadě stojí za povšimnutí také to, že na výhybce č. 63 se objevuje vždy v oblasti 100 Hz na snímači A3Z umístěném na pražci výrazný vrchol převyšující (u některých souprav i několikanásobně) hodnoty na křídlové kolejnici v této frekvenční oblasti. Časově-frekvenční analýza spolehlivě potvrzuje závěry z časové i frekvenční analýzy.

11. Doporučení

Při dalších případných měřeních doporučuji umístit ještě jeden snímač pohybů pražce za snímač S7 (na další pražec). Pohyby pražců ne vždy přímo souvisí se zrychlením vibrací, proto nedoporučuji použití dvojnásobné integrace pro zjištění pohybového chování konstrukce výhybky. Metodiku měření navrhuji obohatit o metody geotechnické diagnostiky (například georadar). Z hlediska diagnostiky výhybek se jeví zajímavou frekvence okolo 100 Hz na pražci pod srdcovkou výhybky a doporučuji v dalších analýzách tomuto věnovat pozornost.

Literatura

- [1] PLÁŠEK, O.: *Měření dynamických účinků ve výhybkách*, 1997
- [2] PLÁŠEK, O.: *Měření dynamických účinků ve výhybkách*, DYN – WIND 2000, Vyhne
- [3] VUKUŠIČ I.: *Hodnocení dynamických účinků ve výhybkách*. Odborná konference doktorského studia JUNIORSTAV 2011
- [4] SMUTNÝ, J.; VUKUŠIČ, I.; TOMANDL, V.: *Zkušenosti z experimentálního měření dlouhých výhybkových pražců*, Vědeckotechnický sborník ČD č. 30/2010, 15 stran.
- [5] ZAREMBSKI, A. M.: *Factors Involved in Turnout Maintenance*. Railway Track & Structures 3/1995, str. 12 – 13, ISSN 0339016
- [6] WIEST, M.; DAVES, W.; FISCHER, F. D.; OSSBERGER, H.: *Deformation and damage of a crossing nose due to wheel passages*
- [7] MARKINE, V.; STEENBERGEN, M., SHEVTSOV, I.: *A Dynamic Model for Analysis of Damage of Railway Switches*, International Symposium on Dynamic of Vehicles on Roads and Tracks, 17-21 August 2009, Stockholm, Sweden
- [8] ZWANENBURG W.-J.: *Modelling Degradation Processes of Switches & Crossings for Maintenance & Renewal Planning on the Swiss Railway Network*, EPFL-LITEP July 2008
- [9] JENKINS, H.; STEPHENSON, J.; CLAYTON, G.; MORLAND, G.; LYON, D.: *The Effect of Track and Vehicle Parameters on Wheel/Rail Vertical Dynamic Forces*, Railway Engineering International, January (1974)
- [10] FISCHER, OBERAIGNER, DAVES, WIEST, BLUMAUER, OSSBERGER: *The Impact of a Wheel on a crossing. Die Stosswirkung eines Rades auf das Herzstück einer Weiche*. ZEV Rail Glasers Annalen 129 (2005) 8 August, ISSN: 1618-8330
- [11] PLÁŠEK, O.: *Dynamické jevy v konstrukci koleje*, Habilitační přednáška, 30.10.2006, počet stran 30
- [12] ANDERSSON, C.; DAHLBERG, T.: *Wheel/Rail Impacts at a Railway Turnout Crossing*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 212 Part F (1998)
- [13] JANDOVÁ, K.: *Vibrodiagnostika*. Presentace
- [14] TOMANDL, V.: *Analýza dynamických parametrů kolejnicových upevnění*. Brno, 2007. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
- [15] SMUTNÝ, J.: *Moderní metody analýzy hluku a vibrací aplikované na kolejovou dopravu*, Teze k doktorandské disertační práci, VUT Brno, ISBN 80-214-0988-6
- [16] SMUTNÝ, J.: *Železniční konstrukce II (CN 04)*, Přednáška č.2 2011, [cit. 2012.2.20]
- [17] BRÜEL&KJÆR: *Měření chvění*, brožura
- [18] NOVÝ, R.: *Hluk a chvění*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2000, počet stran 389, ISBN 80-01-02246-3